

doi:10.3788/gzxb20144309.0914002

# 短脉冲激光加工硅膜的传热过程及烧蚀图形的二维计算

金方圆<sup>1,2</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 鄂书林<sup>1</sup>, 王海峰<sup>1</sup>

(1 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘 要:**为研究短脉冲激光辐照硅膜表面后的能量传输过程,基于双温方程的计算方法以及自由电子气理论,建立了求解能量传输方程的二维有限元模型.针对红外以及可见光波段的激光,通过限制硅膜的大小,有效地控制了计算的精度,并得到电子温度与热流的时间以及空间分布.计算结果表明,激光诱导产生的等离子体密度极大地影响了硅膜表面的反射率及光吸收系数;通过分析电子热流密度随时间的变化曲线,得到硅膜内部能量的传输过程;在激光作用过程中,硅膜内部晶格温度始终保持在熔点以下,证明了等离子体密度是激光烧蚀硅膜的主导因素;预测了激光烧蚀的图形,并分析了不同波长的激光烧蚀图形与高斯曲线的关系.

**关键词:**激光加工;红外吸收;激光热传导;热传导-数学计算;硅膜

中图分类号:TN241

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)09-0914002-7

## 2D Calculation of Heating Process and Crater Shape for Ultrashort Lasers Ablation Silicon Films

JIN Fang-yuan<sup>1,2</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, E Shu-lin<sup>1</sup>, WANG Hai-feng<sup>1</sup>

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Based on two-temperature model and free-electron gas model, a new calculation method, finite element model is fabricated, which provides a new perspective into studying the energy transport process in silicon film irradiated by ultrashort laser pulses. By choosing suitable thickness of silicon films, the 2D spatial and temporal evolutions of the electron temperature as well as carrier density in silicon film irradiated by IR and visible lasers are obtained. The evolutions of complex refractive index and plasma reflectivity are also calculated, through analysis, results show that they are dominated by carrier density. By depicting the electron heat flux evolutions, the energy transport process is analyzed. The distributions of lattice and carrier density are depicted, results show that the lattice temperature is stayed well down below the melting point, and the critical density of carrier density is the dominated factor of ablation. The calculated threshold fluences are validated by comparing study and experimental data. The predicted crater shapes are obtained, which are waiting for experimental validating.

**Key words:** Laser ablation; Infrared absorption; Laser heating; Heat transfer-mathematical models; Silicon films

**OCIS Codes:** 140.3330; 140.3390; 140.7090

基金项目:国家自然科学基金(No. 10878004/A03)资助

第一作者:金方圆(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为微光学器件加工的研究. Email:jinfangyuan610@163.com

导师(通讯作者):陈波(1961-),男,研究员,博士,主要研究方向为空间短波光学技术研究. Email:chenb@ciomp.ac.cn

收稿日期:2014-01-17;录用日期:2014-03-25

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

近年来,激光加工硅及其化合物的研究备受关注,并取得了一系列的进展.研究证明,短脉冲激光加工技术在提高太阳能电池质量<sup>[1-2]</sup>、制作纳米线<sup>[3]</sup>及其他结构功能器件<sup>[4-5]</sup>的应用上有独特的优势.为研究激光作用过程中,硅膜内部能量传输机制和热加工过程,一系列的研究取得了理论和实验方面的进展<sup>[6-13]</sup>,但是,目前还不能完全理解激光加工物质的原理. Henry<sup>[6]</sup>计算了皮秒激光辐照硅膜的等离子体动力学模型,得到了硅膜内部载流子温度及密度随时间的变化关系. Jostein<sup>[13]</sup>进行了三种不同波长的激光辐照硅膜的理论及实验研究,得到了亚皮秒激光烧蚀硅材料的阈值能量,以及阈值能量随衬底温度的变化关系. 计算结果均表明,激光加工硅材料的机制跟晶格温度无关,而是与等离子体的密度有关. 由载流子密度沿深度方向分布图可得加工深度<sup>[6,13]</sup>,但一维模型并不能得到晶格温度以及等离子体密度在硅膜内部整体分布情况,因此不能对烧蚀图形进行预测. Sim<sup>[10]</sup>和 Korfiatis<sup>[12]</sup>建立了单脉冲以及多脉冲激光烧蚀硅膜的模型,得到了加工过程发生在晶格温度上升到熔点的区域的结论,从晶格温度的等温线分布得到加工的图形. Sim<sup>[10]</sup>研究的重点集中在波长为 530 nm 的飞秒及皮秒激光烧蚀过程,但是对烧蚀图形的研究内容不多. Korfiatis<sup>[12]</sup>将激光能量沿深度方向分布的函数加以积分,得到了平顶高斯光束以及高斯光束加工的深度和体积,但是不能充分地说明加工机制.

因此,为研究激光辐照硅膜表面后,载流子温度以及密度的二维分布,从而说明激光加工半导体材料的机理,本文结合双温模型以及自由电子气理论,首次运用有限元计算的方法建立了两种不同波长的激光辐照硅膜的模型,研究了硅膜内部能量传输过程,并对激光烧蚀图形进行了预测和分析.

## 1 理论模型

为研究激光烧蚀金属过程中的能量传输以及加热过程, Anisimov<sup>[14]</sup>提出了双温模型. 由于激光作用于半导体以及绝缘体后,材料内部电子会产生多光子电离、

碰撞电离等效<sup>[15-16]</sup>,从而导致自由载流子密度的迅速增加,因此,必须考虑载流子密度的变化. 基于激光等离子体的理论分析,并结合双温方程, Henry<sup>[6]</sup>建立了短脉冲激光烧蚀硅的理论模型. 图 1 是烧蚀模型的三维草图,由于模型沿着激光传输方向是对称的,假设所用激光能量在硅膜表面分布均匀,即  $M^2=1$ ,就可以将模型维度降低为二维,即图中长方形区域.

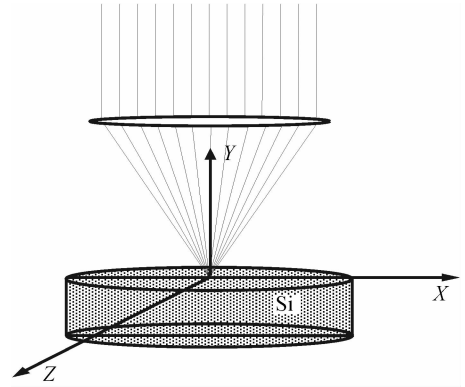


图 1 激光辐照硅膜表面的三维图

Fig. 1 The schematic of three-dimensional silicon film irradiated by ultrashort laser pulses

Henry 的模型可表达为<sup>[6]</sup>

$$\frac{\partial U_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_e \frac{\partial T_e}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( E_g D_0 \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_g D_0 \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{3Nk_B}{\tau_{e-l}} (T_e - T_l) + q_{tot} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_l \frac{\partial T_l}{\partial y} \right) + \frac{3Nk_B}{\tau_{e-l}} (T_e - T_l) \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_0 \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_0 \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \gamma' N^3 + \delta N + \sum \frac{a_n I^n}{n \hbar \omega} \quad (3)$$

方程(1)和(2)描述了激光烧蚀硅膜的能量传输机制,它们控制着电子与晶格的温度( $T_e$ ,  $T_l$ )变化,其中  $U_e$  和  $U_l$  表示电子与晶格的能量. 方程(3)是电子与晶格的能量平衡方程,它控制着自由载流子的密度分布,其中  $a_n$  代表硅的能量吸收效应,其他参数见表 1<sup>[12]</sup>. 激光能量  $q_{tot}$  的分布满足

$$q_{tot} = -\frac{\partial I}{\partial y} = a_1 I + a_2 I^2 + \theta NI \quad (4)$$

表 1 双温模型中材料的光和热参量

Table 1 Thermal and optical physical parameters used in the TTM

Parameter	Symbol	Value
Electron system thermal energy	$U_e$	$3Nk_B T_e$ (J/m <sup>3</sup> )
Boltzmann constant	$k_B$	$1.38 \times 10^{-23}$ (J/K)
Electron heat conductivity	$k_e$	$-0.556 + 7.13 \times 10^{-3} T_e$ (W/(K·m))
Electron-lattice coupling time	$\tau_{e-l}$	$240 \times 10^{-15} \times (1 + (N/N_{cr-sh})^2)$ (s)
Shielding electron density	$N_{cr-sh}$	$6 \times 10^{26}$ (1/m <sup>3</sup> )
Lattice heat capacity	$C_l$	$2.2368 \times 10^6$ (J/(k·m <sup>3</sup> ))

Parameter	Symbol	Value
Lattice heat conductivity/(W·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> )	$k_1$	$1.52 \times 10^5 T_1^{-1.226}$
Electron diffusivity/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	$D_0$	$2.98 \times 10^{-7} T_e$
Auger coefficient/(m <sup>6</sup> ·s <sup>-1</sup> )	$\gamma$	$3.8 \times 10^{-43}$
Minimum Auger lifetime/s	$t_{\min}$	$6 \times 10^{-12}$
Screened Auger recombination	$\gamma' N^3$	$N/(1/(\gamma N^2) + t_{\min})$
Impact ionization coefficient/s <sup>-1</sup>	$\delta$	$1.0 \times 10^{11} (U_e - E_g)$
Band gap in silicon/eV	$E_g^{[19]}$	$1.155 - (4.73e^{-4}) T_1^2 / (635 + T_1)$
Melting point of silicon/K	$T_m$	1683.15
Linear absorption coefficient/m <sup>-1</sup>	$a_1$	$-5895 + 62.26 T_1 - 0.2309 T_1^2 + 3.186 \times 10^{-4} T_1^3 + 9.967$
		$\times 10^{-8} T_1^4 - 1.409 \times 10^{-11} T_1^5$ (1 030 nm)
		$5.02 \times 10^5 \exp(T_1/430)$ (515 nm)
Two-photon absorption coefficient/(m·W <sup>-1</sup> )	$a_2$	$1.5 \times 10^{-11}$ (1030 nm)
		$1.8 \times 10^{-12}$ (515 nm)
		$5 \times 10^{-22} (T_1/300)$ (1030 nm)
Free carrier absorption coefficient/m <sup>2</sup>	$\theta$	$1.2 \times 10^{-22} (T_1/300)$ (515 nm)

式中  $y$  表示激光传输方向,  $a_1$ 、 $a_2$  分别表示线性吸收和双光子吸收系数,  $\theta$  代表自由载流子的吸收系数. 将式(4)积分, 则有

$$I(x, y, t) = \frac{I_0 e^{-(a_1 + \theta N)y}}{1 + (a_2 / (a_1 + \theta N)) I_0 (1 - e^{-(a_1 + \theta N)y})} \quad (5)$$

式中  $I_0$  代表功率密度在硅膜表面的分布<sup>[17-18]</sup>, 即

$$I_0(x, 0, t) = \frac{0.94J(1-R)}{t_p} \exp\left(-\left(\frac{x}{r_0}\right)^2 - 2.773\left(\frac{t-2t_p}{t_p}\right)^2\right) \quad (6)$$

式中  $J$  为激光能量密度,  $R$  为硅膜表面反射率,  $t_p$  为脉宽, 假设  $I_0$  在  $2t_p$  达到最大,  $r_0$  为光斑半径.

激光作用于材料表面后, 由于载流子密度的迅速增加, 会在表面形成等离子体层, 影响激光的进一步吸收. 硅膜表面等离子体反射率可以通过自由电子气理论表达出来, 等离子体的复介电常数方程为<sup>[20]</sup>

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2 = \epsilon_{\text{bg}} \left(1 + \frac{Ne^2}{m_e^* \epsilon_0 \epsilon_{\text{bg}}}\right) \times \left[\frac{-\tau_c^2 + i\tau_c/\omega}{1 + \omega^2 \tau_c^2}\right] = \epsilon_{\text{bg}} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2 \tau_c^2}{1 + \omega^2 \tau_c^2}\right) + i\left(\frac{\omega_p^2 \tau_c}{\omega(1 + \omega^2 \tau_c^2)}\right)\right] \quad (7)$$

式中  $\epsilon_{\text{bg}} = 11.7$  是硅的相对介电常数,  $\tau_c = 1.0$  fs 是碰撞时间,  $m_e^* = 0.33 m_e$  是有效电子质量,  $\omega_p$  是等离子体频率.

等离子体的复折射率系数为  $f = f_1 + i f_2 = \epsilon^{1/2}$ , 其中  $f_1$  和  $f_2$  可表达为

$$f_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2}}, f_2 = \sqrt{\frac{-\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2}} \quad (8)$$

那么, 等离子体的反射率则有

$$R = \frac{[f_1 - 1]^2 + f_2^2}{[f_1 + 1]^2 + f_2^2} \quad (9)$$

本文选用波长为 1 030 nm 和 515 nm, 脉宽为 3 ps

的激光作为光源, 是为了研究红外与可见光波段激光的能量传输过程以及加工效果, 从而根据不同加工要求选用合适的激光波长. 计算采用二维有限元模型, 网格是根据激光能量密度的分布而划分的, 总的误差容忍设置为 0.000 4, 不仅节约了计算时间, 而且保证了计算精度. 所采用的光斑半径  $r_0 = 10 \mu\text{m}$ , 模型中硅膜的厚度是由有效穿透深度  $\delta$  决定的, 即

$$\delta = 1/\alpha_{\text{eff}} = \frac{1}{a_1 + \theta N + a_2 I} = \frac{t_p}{(a_1 + \theta N)t_p + a_2 I_0 (1 - R)} \quad (10)$$

根据有效穿透深度随时间变化关系, 得到对于  $\lambda = 1 030$  nm, 求解区域设置为  $120 \mu\text{m} \times (-40 \mu\text{m})$ , 对于 515 nm, 求解区域为  $20 \mu\text{m} \times (-1 \mu\text{m})$ , 为保证不同厚度的材料模拟效果一致, 边界均设置为 von Neumann 条件, 且其梯度为零. 初始温度设置为 300 K, 载流子密度为  $1 \times 10^{22} \text{m}^{-3}$ ,  $T_e$  和  $T_l$  误差分别设置为 0.8 K 和 0.2 K. 求解时间设置为 20 ps, 此时电子和晶格温度达到平衡.

## 2 结果与讨论

图 2 是电子和晶格温度以及载流子密度变化曲线, 可以看出电子温度和载流子密度变化剧烈且电子温度存在两个峰值, 而晶格温度变化很小. 这是由两方面原因引起的, 一是电子热容量比较小, 只需很小的能量便可使其温度迅速上升, 而晶格热容量比较大, 通过与电子的耦合效应使其上升温度不大; 二是电子的线性和双光子吸收以及俄歇复合效应, 使得硅膜内部的载流子密度上升, 从而降低电子平均温度. 由于电子的吸收效应以及俄歇复合效应比升温所需时间长, 载流子密度的提高会存在一定的延迟.

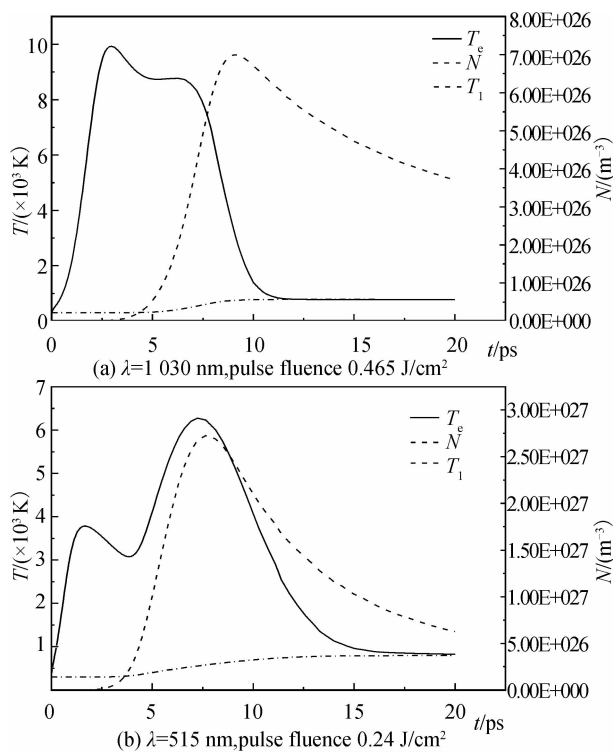


图2 表面电子与晶格温度以及载流子密度随时间变化  
Fig. 2 Surface temperature and carrier density evolutions with the delay time

图3 描绘了硅膜表面等离子体反射率随时间的变化,其初始值为 0.30. 可见,硅膜的热吸收率在红外激

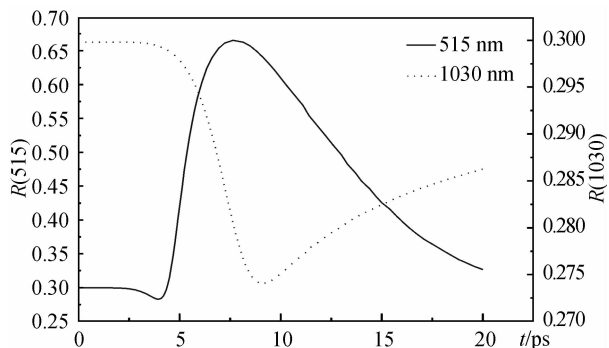


图3 1030 nm(虚线)和515 nm(实线)激光作用下反射率随时间变化  
Fig. 3 The evolutions of reflectivity for 515 nm (solid) and 1030 nm (dash) laser pulses

光作用下比在可见光波段大,这可由图4 折射系数的实部和虚部的变化曲线表达. 对于 $\lambda=1030\text{ nm}$ , 折射系数的实部和虚部变化都很小,分别为  $f_1 \in (0.300 \sim 0.275)$ ,  $f_2 \in (1.210 \times 10^{-5} \sim 0.837)$ , 而对于  $\lambda=515\text{ nm}$ ,  $f_1 \in (-8.221 \sim 11.700)$  和  $f_2 \in (1.295 \times 10^{-5} \sim 35.326)$ . 由式(7)可知,硅膜的折射系数是由表面自由载流子密度决定的,它通过影响等离子体碰撞频率表现出来. 当载流子密度  $N$  达到一定值时,硅膜表面等离子体碰撞频率  $\omega_p$  满足

$$\frac{Ne^2}{m_e^* \epsilon_0 \epsilon_{bg}} = \omega_p^2 \approx \left( \frac{1}{\tau_c^2} + \omega^2 \right) \quad (11)$$

此时,硅膜表面折射率系数变化比较大. 自由电子碰撞时间  $\tau_c$  同样影响反射率的大小. 室温下,其值为  $10^{-15}$  至  $10^{-14}\text{ s}$ ,高温导致其变化关系需进一步求证.

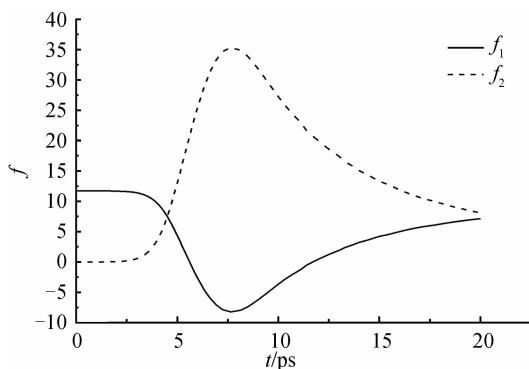


图4 515 nm 激光作用下,折射系数的实部(实线)与虚部(虚线)变化曲线  
Fig. 4 The evolutions of refractive index  $f_1$  and  $f_2$  for  $\lambda=515\text{ nm}$

由于不同波长激光作用在硅表面的能量传输原理相同,这里主要介绍硅膜在 1030 nm 激光作用后电子与晶格的加热过程. 由式(1)、(4)可知,激光能量沿传播方向对称分布,导致电子温度的对称分布. 图5(a)描绘了 2.96 ps 时,电子等温线的空间分布图,第一条等温线为 9706 K,最后一条为 6340 K,可见,硅膜内部很大区域的电子被加热. 这是由有效穿透深度决定的,

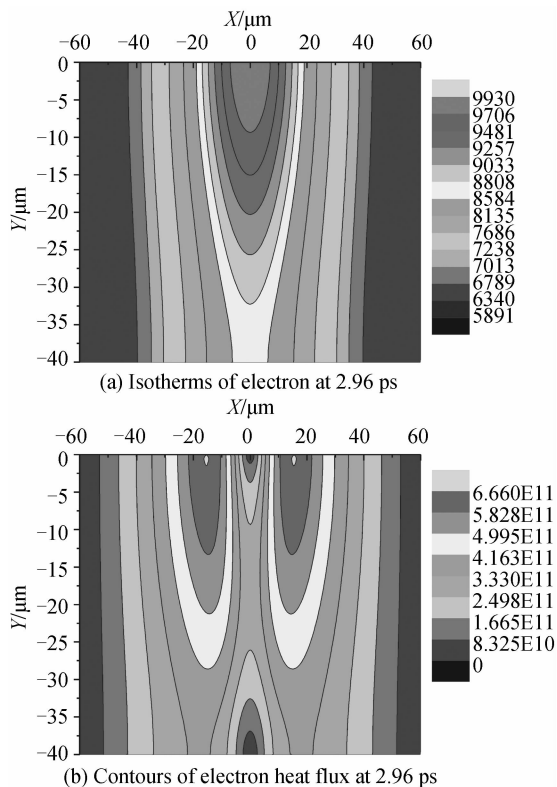
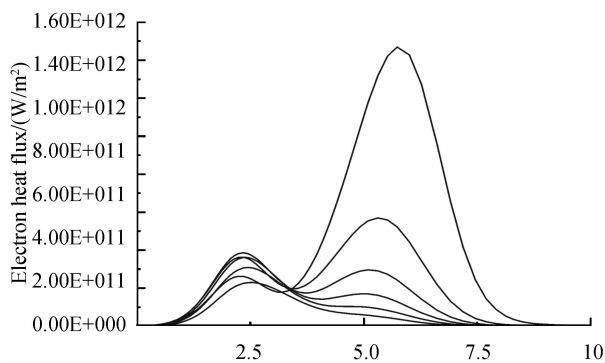


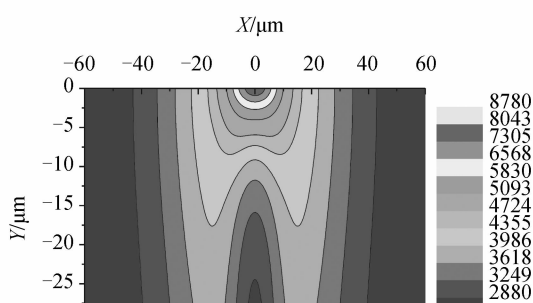
图5  $\lambda=1030\text{ nm}$ , 能量密度为  $0.465\text{ J/cm}^2$  激光作用下, 2.96 ps 时电子温度的空间分布与电子热流的等高图  
Fig. 5 Isotherms of electron and contours of electron heat flux for  $\lambda=1030\text{ nm}$ , pulse fluence  $0.465\text{ J/cm}^2$  at 2.96 ps

由式(9)得,对于1064 nm和515 nm的激光辐照初期,硅膜的有效穿透深度分别为11  $\mu\text{m}$ 和1  $\mu\text{m}$ ,而对于1030 nm激光,硅膜内部温度上升的区域深度大于40  $\mu\text{m}$ .可见,波长越大,激光越容易将能量传输到更深的区域.硅膜表面反射率、有效穿透深度差别,决定了可见光波段的激光比红外激光更能集中加热硅膜.

硅膜内部能量对称分布导致内部热流沿着激光穿透方向对称发散分布,图5(b)是2.96 ps时电子热流的等高图,其最大值为 $6.64 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$ ,位于 $x = \pm 14.4 \mu\text{m}$ , $y = -0.8 \mu\text{m}$ 处.由于电子热流随时间改变,很难得到每个位置的热流随时间变化关系.图6(a)描绘了 $x = 0$ , $y = -5 \mu\text{m}$ , $-10 \mu\text{m}$ , $-15 \mu\text{m}$ , $-20 \mu\text{m}$ , $-25 \mu\text{m}$ ,和 $-30 \mu\text{m}$ 处的热流随时间变化曲线,深度越大,热流值越小;同电子温度随时间变化曲线相似,它们也有两个峰值.前期热流分布图,可预测电子温度的整体变化趋势,这在图6(b)表现了出来.



(a) The electron heat flux evolutions with the delay time



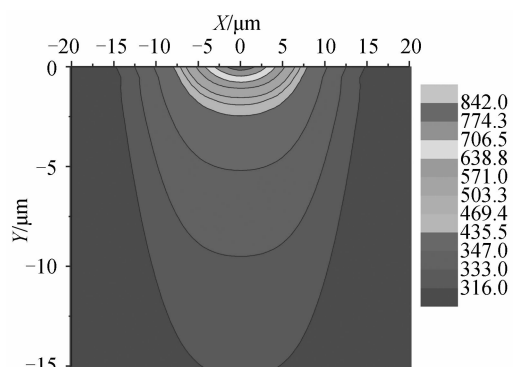
(b) Spatial distribution of electron temperature at 6 ps

图6  $\lambda = 1030 \text{ nm}$ , 能量密度为  $0.465 \text{ J/cm}^2$  激光作用下,不同深度电子热流随时间变化曲线和电子温度在6 ps时分布曲线

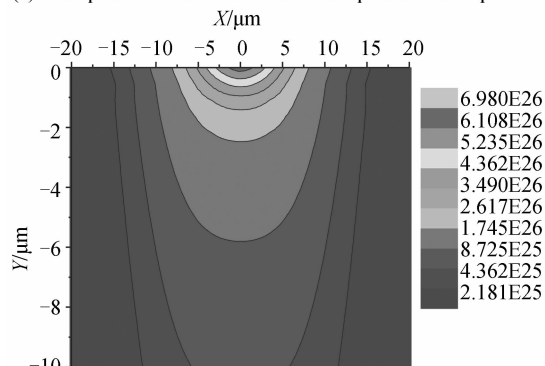
Fig. 6 The electron heat flux evolutions with the delay time and spatial distribution of electron temperature at 6 ps for  $\lambda = 1030 \text{ nm}$ , pulse fluence  $0.465 \text{ J/cm}^2$  at 2.96 ps

电子温度迅速上升后,与晶格发生碰撞耦合,将一部分能量传给晶格,直至二者达到温度平衡,图7(a)是20 ps时,晶格等温线的空间分布图.此时电子和晶格达到平衡温度,硅膜表面晶格温度达到最大值850 K.

图7(b)是9 ps时,自由载流子密度分布图,此时存在最大值 $6.9 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ .由于过程中晶格温度低于熔点 $T_m$ ,因此,研究激光作用后载流子密度分布的规律就显得十分有意义.自由电子气理论研究表明<sup>[21-22]</sup>,激光与等离子体的作用导致物质发生相变;只有载流子密度达到一定值时,表面等离子体振动频率等于激光频率,其密度达到饱和,材料才能被加工<sup>[23-24]</sup>.Chen和Jostein的研究证明<sup>[13,17]</sup>,对于1030 nm的激光, $N_{cr} = 6.9 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ ,且载流子的阈值密度满足 $N_{cr} \propto 1/\lambda^2$ .由图7(b)可见,对于1030 nm激光,能量密度达到 $0.465 \text{ J/cm}^2$ 恰好可使载流子密度达到 $N_{cr}$ ,跟实验结果<sup>[13]</sup>( $0.46 \text{ J/cm}^2$ )吻合;由图2(b)可知,对于515 nm激光,能量密度达到 $0.24 \text{ J/cm}^2$ 可使载流子密度达到 $4N_{cr}$ ,证明利用有限元模型分析能量传输过程的准确性.



(a) The spatial distribution of lattice temperature at 20 ps



(b) The spatial distribution of carrier density at 9 ps

图7  $\lambda = 1030 \text{ nm}$ , 能量密度为  $0.465 \text{ J/cm}^2$  激光作用下,20 ps时晶格温度分布图和9 ps时载流子密度分布图  
Fig. 7 The spatial distribution of lattice temperature at 20 ps and carrier density at 9 ps for  $\lambda = 1030 \text{ nm}$ , pulse fluence  $0.465 \text{ J/cm}^2$

激光烧蚀的图形决定于激光波长、能量密度等参量.图8给出了激光能量密度高于烧蚀阈值时,模拟得到的烧蚀图形,它也是存在最大载流子密度时 $N = N_{cr}$ 的等高线.由图可知,对于1030 nm的激光,其能量密度越大,所得到的烧蚀图形底部显得越平,而对于515 nm的激光,模拟结果恰恰相反.这种平底烧蚀图形的现象,已从理论和实验方面得到证实<sup>[20,25-26]</sup>.可见,1030 nm激光更容易实现宽度小、深度大的加工要求.

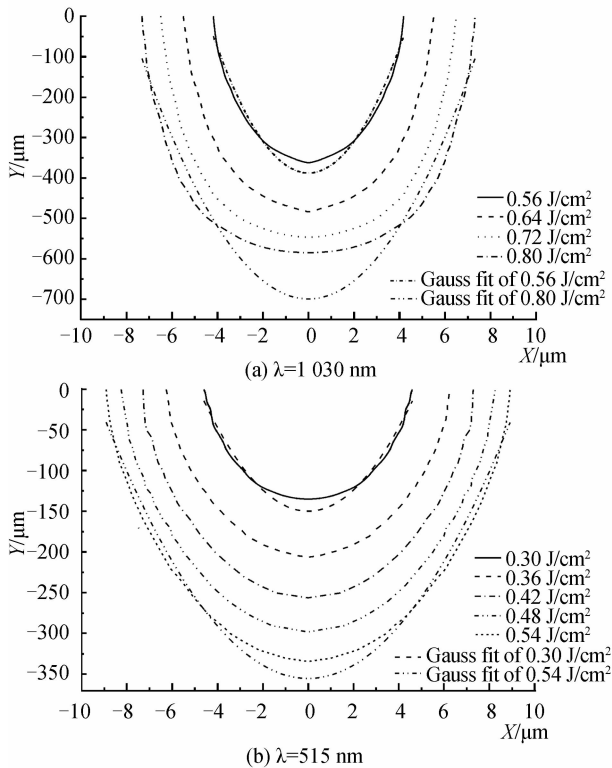


图8 不同能量密度的激光烧蚀的图形及高斯拟合曲线  
Fig. 8 Dependence of crater shapes on laser fluence for  $\lambda = 1030 \text{ nm}$  and  $\lambda = 515 \text{ nm}$  and their Gauss fitting lines

针对平底烧蚀图形的现象,对烧蚀图形的二维曲线进行了高斯拟合,发现515 nm的激光烧蚀图形越来越接近高斯曲线,而对于1030 nm激光烧蚀图形拟合结果相反.烧蚀图形模拟结果表明红外激光更适合打孔,可见光波段的激光更适合用于加工高精度的器件.

### 3 结论

基于双温模型和自由电子气理论,建立了有限元模型,研究了红外和可见光波段的短脉冲激光辐照下,硅膜内部能量传输机制.模拟结果表明,激光能量、电子与晶格的耦合、电子的吸收效应以及俄歇复合效应共同影响电子与晶格温度以及载流子密度;从反射率和电子温度分布图可知,虽然硅膜对红外激光吸收率高,但是其有效穿透深度大,导致可见光波段的激光更容易集中加热硅膜;热流分布导致电子温度呈现特殊的分布;从晶格温度和自由载流子密度分布图可知,激光加工硅膜的阈值能量密度是由载流子密度决定的,有限元方法所得到的阈值能量密度同文献的理论和实验结果相符;通过对烧蚀图形的分析,证明了红外激光适合于打孔而可见光波段激光适合于微切割.

#### 参考文献

[1] STEFAN H, Gunnar S, Christoph Z, *et al.* Analysis of the laser ablation processes for thin-film silicon solar cells [J]. *Applied Physics A*, 2008, **92**(4): 755-759.  
[2] DAVID S A, Hwang J, Park H K, *et al.* Femtosecond laser

drilling of crystalline and multicrystalline silicon for advanced solar cell fabrication [J]. *Applied Physics A*, 2012, **108**(1): 113-120.  
[3] KOKAI F, Inoue S, Hidaka H, *et al.* Catalyst-free growth of amorphous silicon nanowires by laser ablation [J]. *Applied Physics A*, 2013, **112**(1): 1-7.  
[4] ZHOU Zi-gang, LUO Chen, YANG Yong-jia, *et al.* Fabrication of  $1 \times 4$  optical waveguide splitter by femtosecond laser in  $\text{LiNbO}_3$  [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 402-404.  
周自刚, 罗晨, 杨永佳, 等. 飞秒激光刻写  $1 \times 4$  铌酸锂光波导功分器的研究 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 402-404.  
[5] ZHANG C Y, YAO J W, LI C Q, *et al.* Asymmetric femtosecond laser ablation of silicon surface governed by the evolution of surface nanostructures [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(4): 4439-4446.  
[6] HENRY M, VAN D. Kinetics of high-density plasmas generated in Si by 1.06 and 0.53  $\mu\text{m}$  picosecond laser pulses [J]. *Physical Review B*, 1987, **35**(15): 8166-8176.  
[7] BONSE J, BAUDACH S, KRÜGER J, *et al.* Femtosecond laser ablation of silicon-modification thresholds and morphology [J]. *Applied Physics A*, 2002, **74**(1): 19-25.  
[8] 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**(3-4): 501-509.  
[9] CHOI T Y, GRIGOROPOULOS C P. Plasma and ablation dynamics in ultrafast laser processing of crystalline silicon [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **92**(9): 4918-4925.  
[10] SIM H S, LEE S H, LEE J S. Numerical analysis of crater formation and ablation depth in thin silicon films heated by ultrashort pulse train lasers [J]. *Journal of Mechanical Science Technology*, 2007, **21**(11): 1847-1854.  
[11] SIM H S, LEE S H, KANG K G. Femtosecond pulse laser interactions with thin silicon films and crater formation considering optical phonons and wave interference [J]. *Microsyst Technology*, 2008, **14**(9-11): 1439-1446.  
[12] KORFIATIS D P, THOMA K T, VARDAXOGLU J C. Numerical modeling of ultrashort-pulse laser ablation of silicon [J]. *Applied Surface Science*, 2009, **255**(17): 7605-7609.  
[13] JOSTEIN T, SEAN E F. Temperature dependent ablation threshold in silicon using ultrashort laser pulses [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(10): 103514.  
[14] ANISIMOV S I, KAPELIOVICH B L, PERELMAN T L. Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses [J]. *Soviet Physics - JEPT*, 1974, **39**(2): 375-377.  
[15] GULLEY J R, WINKLER S W, DENNIS W M, *et al.* Interaction of ultrashort-laser pulses with induced undercritical plasmas in fused silica [J]. *Physical Review B*, 2012, **85**(1): 013808-1-10.  
[16] WU A Q, CHOWDHURY I H, XU X F. Femtosecond laser absorption in fused silica: numerical and experimental investigation [J]. *Physical Review B*, 2005, **72**(8): 085128.  
[17] WANG T F, GUO J, SHAO J F, *et al.* Heating process and damage threshold analysis of Au film coated Cu substrate for femtosecond laser [J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, **44**(5): 1551-1555.  
[18] BURAKOV I M, BULGAKOVA N M, STOIAN R, *et al.* Theoretical investigations of material modification using temporally shaped femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics A*, 2005, **81**(8): 1639-1645.  
[19] UNAL A A, STALMASHONAK A, SEIFERT G, *et al.*

- Ultrafast dynamics of silver nanoparticle shape transformation studied by femtosecond pulse-pair irradiation [J]. *Physical Review B*, 2009, **79**(11):115411-1-7.
- [20] JIANG L, TSAI H L. A plasma model combined with an improved two-temperature equation for ultrafast laser ablation of dielectrics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **104**(9): 093101-1-7.
- [21] LINDE D V, SCHÜLER H. Breakdown threshold and plasma formation in femtosecond laser-solid interaction [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, **13**(1):216-223.
- [22] LADIEU F, MARTIN P, GUIZARD S. Measuring thermal effects in femtosecond laser-induced breakdown of dielectrics [J]. *Applied Physics Letter*, 2002, **81**(6):957-959.
- [23] PERRY M D, STUART B C, Banks P S, *et al.* Ultrashort pulse laser machining of dielectric materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, **85**(9):6803-6810.
- [24] XU X, CHEN G, SONG K H. Experimental and numerical investigation of heat transfer and phase change phenomena during excimer laser interaction with nickel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, **42**(8): 1371-1382.
- [25] ZAKHAROV A S, VOLKOV M V, GUROV I P. Interferometric diagnostics of ablation craters formed by femtosecond laser pulses [J]. *Journal of Optical Technology*, 2002, **69**(7):478-482.
- [26] BONSE J, MUNZ M, STURM H. Structure formation on the surface of indium phosphide irradiated by femtosecond laser pulses [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **97**(1): 013538-1-9.