

doi:10.3788/gzxb20174610.1014004

# 飞秒激光打孔硅的孔洞形貌研究

李志明<sup>1</sup>, 王玺<sup>1</sup>, 聂劲松<sup>1</sup>

(电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

**摘 要:**在飞秒激光打孔硅材料过程中,为了得到表面等离子体效应和激光烧蚀形成的孔洞对后续激光能量在孔内分布的影响,建立单脉冲等离子体阈值理论模型及设计连续飞秒激光烧蚀硅材料实验.理论计算得到的损伤阈值为  $0.21 \text{ J/cm}^2$ ,符合实验模型测得的阈值  $0.20 \sim 0.25 \text{ J/cm}^2$ .当载流子密度达到临界值  $N_{cr}$ ,等离子体的激发会导致表面反射率短时间内急剧上升.入射激光通量从  $0.5 \text{ J/cm}^2$  增大到  $3.0 \text{ J/cm}^2$ ,烧蚀深度逐渐增大并趋于约  $1.1 \mu\text{m}$ ,同时脉宽从  $150 \text{ fs}$  减小到  $50 \text{ fs}$ ,烧蚀结构类似于椭圆形烧蚀轮廓.后续激光脉冲辐照在已形成的孔洞上时,基于时域有限差分法,控制光束与孔壁的夹角从  $79^\circ$  到  $49^\circ$ ,激光能量越接近孔底中心,越易引发该范围内的等离子体激发;且在不同偏振态光束辐照下,孔底的能量分布不同会造成相应特殊的烧蚀形貌.增大激光通量和减小脉冲宽度获得理想的初始孔洞结构,可使后续脉冲能量集中孔底中心区域,打孔效果更好.

**关键词:**飞秒激光;硅;非热效应;双温方程;等离子体;烧蚀轮廓

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)10-1014004-8

## Hole Morphology in Femtosecond Laser Drilling of Silicon

LI Zhi-ming<sup>1</sup>, WANG Xi<sup>1</sup>, NIE Jin-song<sup>1</sup>

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** In the femtosecond laser drilling of silicon material, in order to the influence of the surface plasma effect and hole geometries on the redistribution of the follow-up laser energy, the theoretical model and multi-pulse ablation experiment were established. Theoretical calculation of the damage threshold  $0.21 \text{ J/cm}^2$  is in line with the experimental model measured threshold  $0.20 \sim 0.25 \text{ J/cm}^2$ . When the carrier density reaches the critical value  $N_{cr}$ , the excitation of the plasma causes the surface reflectance to rise rapidly. With a larger of laser fluence from  $0.5 \text{ J/cm}^2$  to  $3.0 \text{ J/cm}^2$ , ablation depth increases to about  $1.1 \mu\text{m}$ , and while the pulse width from  $150 \text{ fs}$  reduced to  $50 \text{ fs}$ , ablation structure become more similar to the oval ablation profile. What's more, the effect of different hole structure on the laser beam propagation inside the micro-hole of silicon wafer is obtained by numerically using FDTD method. It's found that the position of the maximum laser intensity point would be closer to the hole enter by decreasing taper angle from  $79^\circ$  to  $49^\circ$ , which finally cause the excitation of plasma more likely. Besides, under different polarization beam irradiation, the energy distribution at the bottom of the hole induced different special ablation structures. The results show that by increasing laser fluence and decreasing pulse width, the ideal initial pore structure can be obtained so that the subsequent pulse energy is concentrated at the bottom center making the drilling efficiency higher.

**Key words:** Femtosecond laser; Silicon; Non-thermal effect; Two-temperature equation; Plasma; Ablation profile

**OCIS Codes:** 140.7090;140.3380;140.6810;160.6000

基金项目:国家自然科学基金青年项目(No.41605015)资助

第一作者:李志明(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光与物质的相互作用.Email: 774762592@qq.com

导师(通讯作者):聂劲松(1971-),男,教授,博士,主要研究方向为激光对抗应用.Email: njs7001@sina.com

收稿日期:2017-04-26;录用日期:2017-06-29

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

## 0 引言

飞秒激光因具有脉宽窄、峰值功率高等特性可以完全电离硅材料,在扫描、切割材料方面有着减少重铸、裂纹微小、切口平整等优势,因此在材料微/纳米级加工方面得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>.飞秒脉冲激光对硅材料的损伤实质是电子通过线性和非线性过程吸收能量从基带跃迁到导带并在短时间内积累到临界密度,一旦超过临界密度就会产生对硅的烧蚀效果<sup>[4]</sup>.在该过程中,自由载流子的激发对硅的光学性质改变起到主要作用,一旦在材料表面产生临界自由电子密度,硅表面变得像金属一样具有高的反射率,且吸收的能量在时间内主要集中在非常薄的表面层<sup>[5]</sup>,形成初始“孔洞”.在后续脉冲作用时,光束经过初始孔壁的多次反射,高斯脉冲在孔内呈现出特殊结构的能量分布.而在激光打击钻孔的后期阶段,能够到达孔底部的激光能量决定了激光钻孔深度.理论上已经证明激光强度大的区域可以产生更多的等离子体,因此激光打孔过程中孔内的能量分布对烧蚀效果具有重要的影响<sup>[6]</sup>.在这方面,Jiao等在2015年理论研究了在已形成的孔洞内,入射光与孔壁的不同夹角下飞秒激光的能量分布<sup>[7]</sup>.

虽然已有文献中描述了关于模拟飞秒激光打孔硅,并在理论上对双温模型及等离子体阈值模型进行了介绍,但在考虑到反射率的变化和相应的材料去除机制上仍有争议<sup>[8,9]</sup>.Thibault等在考虑产生等离子体效应的基础上利用双温模型分析了飞秒激光烧蚀硅材料的情况,但未考虑反射率的变化<sup>[10]</sup>.由于硅表面的反射率变化引起入射激光能量在硅表面的再分布,造成不同的烧蚀程度.本文基于Korfiatis等改进后的双温方程和德鲁德模型计算飞秒激光烧蚀硅的空间最大电子数密度分布<sup>[11]</sup>,得到等离子体阈值模型下的损伤阈值及烧蚀形貌,并通过设计实验验证该模型的正确性.同时,基于FDTD的方法分析孔洞形貌对后续脉冲能量的分布影响,在椭圆和圆两种偏振态下,对不同结构的孔洞形貌下激光在孔内的能量分布进行分析对比,探究初始激光能量和脉冲宽度对孔洞形貌的影响.

## 1 实验设计和理论模型

实验设计如图1,激光器中心波长为800 nm,脉宽为50 fs,重频为10 Hz的钛宝石飞秒激光器.光路中分束镜以1:1比例将脉冲分为泵浦光和探测光,分光镜前的偏振片和衰减片用来控制脉冲的偏振方向和能量.一束泵浦光经过快门得到单个脉冲打到硅表面,另一束探测光入射到能量计探测其能量.每次泵浦光烧蚀硅材料后,调整衰减片改变能量,重复操作得到一系列不同孔径大小的烧蚀孔洞并通过电子扫描显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察.

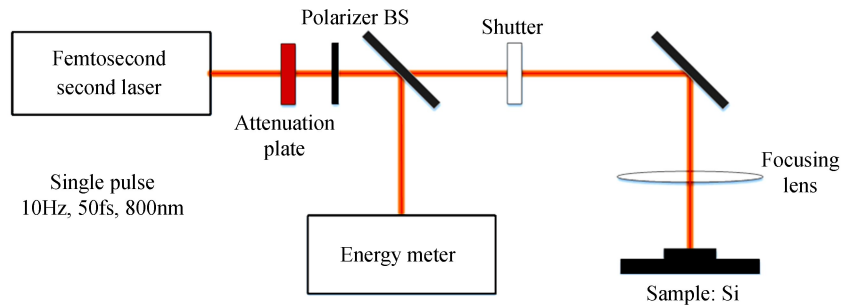


图1 实验装置示意图

Fig.1 Sketch plot of the experimental setup

在飞秒脉冲激光辐照下,硅材料中电子通过单光子或双光子吸收从价带跃迁到导带上,由于电子-晶格能量耦合,晶格受热在几个皮秒到纳秒内发生烧蚀,烧蚀过程一般以非热损伤为主,即空穴与空穴间共价键发生“冷”断裂<sup>[11]</sup>.根据自由电子气理论,当自由电子密度达到临界值时会产生类似于金属特性的等离子体,激光与等离子体的相互作用导致材料去除,基于最大临界电子密度的假设,此时表面等离子体振动频率等于激光频率,其密度达到饱和,材料才能被烧蚀,且烧蚀深度为最大电子密度等于临界电子密度时的取值<sup>[12-13]</sup>.同时Li等也在理论上分析了阈值电子密度可作为烧蚀边界条件<sup>[8]</sup>.引入单光子吸收和双光子吸收,电子扩散,俄歇复合等过程,得到电子数密度及电子与晶格的温度方程<sup>[9]</sup>为

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = \nabla(k_B T_e u_e \nabla N_e) + \frac{\sigma_1 I}{h\nu} + \frac{\sigma_2 I^2}{h\nu} - R_e \quad (1)$$

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla(\kappa_e \nabla T_e) - \gamma(T_e - T_{Si}) + S(x, t) \quad (2)$$

$$C_{Si} \frac{\partial T_{Si}}{\partial t} = \nabla(\kappa_{Si} \nabla T_{Si}) + \gamma(T_e - T_{Si}) \quad (3)$$

具体参数见文献[16],由于是计算电子浓度上升到最大值的过程,且是在几个皮秒时间内发生的,所以忽略了晶格的融化和升华过程,入射光强可以写成

$$\frac{dI}{dz} = -(\sigma_1 I + \sigma_2 I^2 + \sigma_{Fcr}) \quad (4)$$

$$I(r, z=0, t) = (1-R)(2F_0/\tau_p) \sqrt{\ln 2/\pi} e^{-2(r/r_0)^2} e^{-4 \ln 2 [(t-t_0)/\tau_p]^2} \quad (5)$$

式中  $I(r, z=0, t)$  为光强照射在硅表面的二维分布,  $r_0$  为高斯光源能量在峰值能量  $1/e^2$  处的光束半径. 由于产生大量自由载流子,这时硅的表面光学性质发生变化,考虑到光克尔效应和双光子吸收,最终有效的介电常数可由德鲁德模型得到<sup>[14]</sup>,即

$$\epsilon_{ex} = \epsilon_{Si}(N_e) + \epsilon_{NL} \quad (6)$$

具体参数见文献[17].当自由电子密度等于或高于临界电子密度时,硅的小范围体积内将发生烧蚀现象,选择临界电子密度  $n_{cr}$  作为激发等离子体阈值,即

$$n_{cr} = \epsilon_r \epsilon_0 m_e^* [1 + \omega^2 \tau^2] / (e\tau)^2 \quad (7)$$

## 2 实验和仿真结果分析

当材料吸收的能量超过损伤阈值时,晶体硅表面出现消融或变质等破损形式.在本文实验中,在飞秒激光参数中,选择脉宽为 50 fs,波长为 800 nm 的高斯光源,损伤阈值  $F_{th}$  通过烧蚀半径  $D$  与聚焦半径  $\omega_0$  的关系式  $D^2 = 2\omega_0^2 \ln(F_0/F_{th})$  来确定.

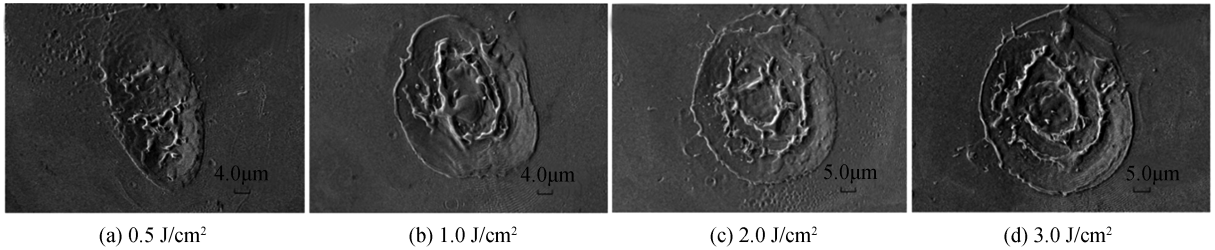


图 2 不同激光通量下硅表面烧蚀实验结果

Fig.2 Experimental results of ablation of silicon surface under different laser fluence

改变入射到硅表面的激光通量  $F_0$  大小,脉宽 50fs 下损伤情况如图 2.激光强度不断增强时,图像从(a)到(d)产生硅的溅射物半径尺寸依次增大.当入射通量在损伤阈值范围( $0.5 \sim 3.0 \text{ J/cm}^2$ )内,硅表面出现明显的融化后凝固现象,形貌呈近似圆孔状,并且由于材料迅速凝固,形成无序的结构.图 3 为烧蚀半径随入射激光通量的变化.实验测得的半径波动范围约为  $1.5 \mu\text{m}$ ,理论半径值与该范围内实验数据近似吻合.同时,理论模型测得的阈值通量为  $0.21 \text{ J/cm}^2$ ,这与实验测得结果代入式(8)计算得到的阈值范围( $0.20 \sim 0.25 \text{ J/cm}^2$ )符合得相对较好.为了进一步验证模型的准确性,图 4 给出了飞秒激光在脉宽为  $100 \text{ fs} < \tau < 200 \text{ fs}$  的损伤阈值结果,用实验拟合的脉宽定律:  $F = \tau^x$  (其中  $\tau$  为脉冲宽度,  $x$  可以通过实验拟合得到,在文献[11]中取 0.309)进行对比(理论模型的偏微分方程使用有限差分软件 COMSOL 进行计算,时间步长取 0.1 fs,空间步长取 50 nm,容差取 0.01,高斯光源半径取  $5 \mu\text{m}$ ),发现计算结果与实验值相近,说明了模型的准确性.

图 5 为激发最大电子数密度随入射激光通量的演化图,其中插图对应图中标注激光通量下的电子密度空间分布,黑色等值线为激发等离子体阈值密度曲线.图 5(a)激光通量为  $0.2 \text{ J/cm}^2$  时,最大电子数没有达到激发等离子体阈值密度,此时认为该激光通量下,硅表面没有发生损伤.从图 5(c)  $0.3 \text{ J/cm}^2$  到图 5(d)  $2 \text{ J/cm}^2$ ,随着激光通量的增加,最大电子数密度逐渐增大,等值线扩大且底部轮廓逐渐平整,最终类似于平顶椭圆的形状,这里也可以由激发等离子体后硅内部的反射率的改变来解释,如图 3.当最大电子数密度达到临界值,激发等离子体使得硅表面反射率急剧上升,如图 6,反射率数值表现出与最大电子浓度阈值的轮廓分布,因为该范围内由于等离子体的作用致使图中所示局部烧蚀区域反射率处于高值.

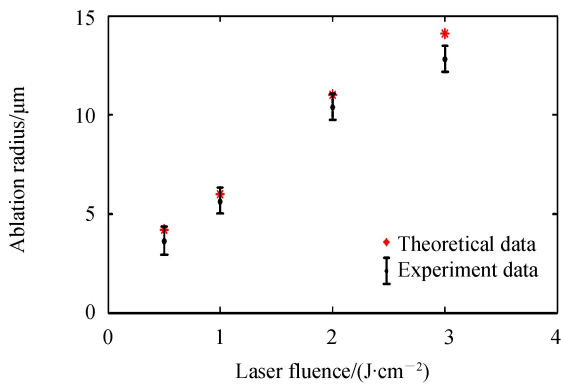


图3 烧蚀半径随入射激光通量的变化  
Fig.3 Evolution of ablation radius with the laser fluence

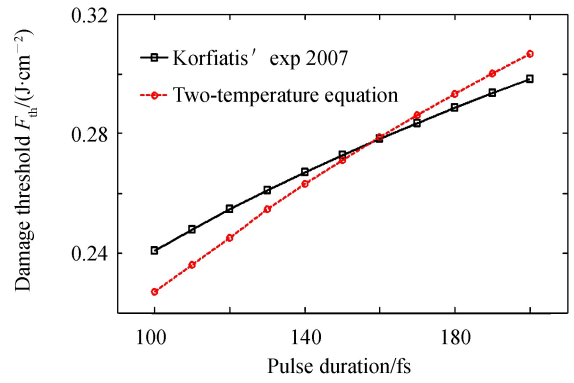


图4 损伤阈值随脉宽变化的趋势  
Fig.4 Damage threshold of laser fluence as a function of pulse width

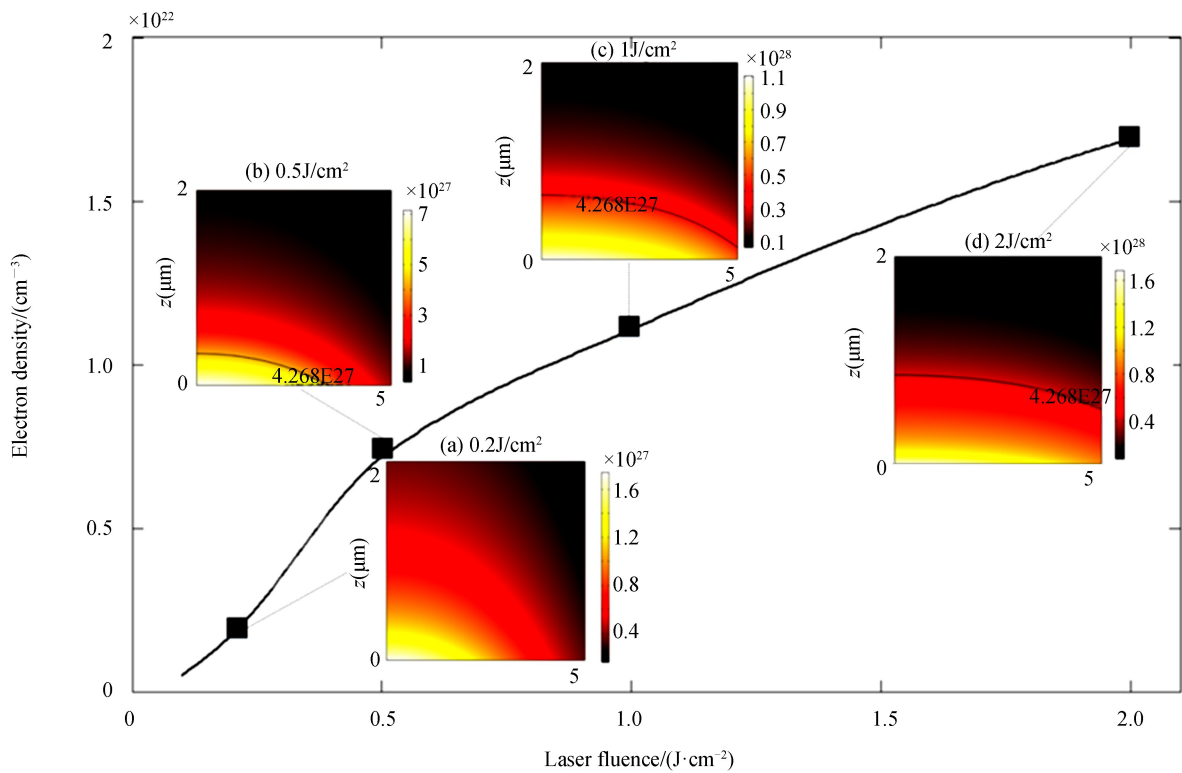


图5 最大电子数密度随激光通量的分布  
Fig.5 Evolution of the maximum electron density distribution with laser fluence

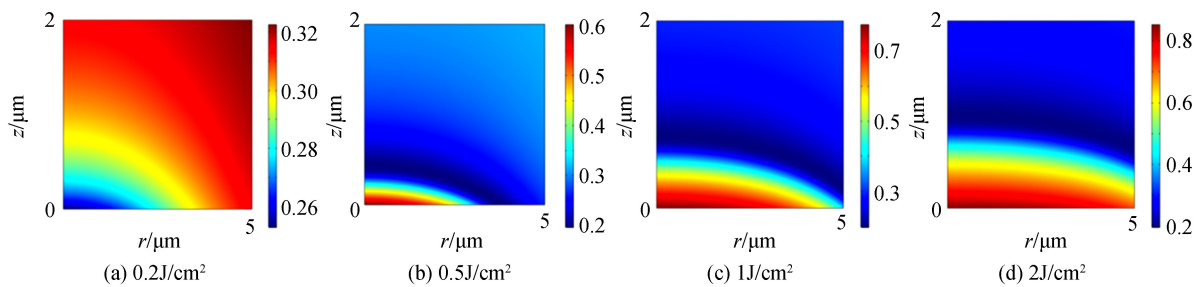


图6 二维最大电子密度下硅内部的反射率分布  
Fig.6 Two-dimensional distribution map of the silicon reflectance under maximum electron density

图7(b)为硅表面烧蚀深度随激光通量的演化,随着激光通量的增加,烧蚀深度逐渐增大,但同时增大趋势逐渐降低,最终光通量达到一定值时,深度趋于稳定,这时可以认为该深度为单个脉冲烧蚀最大深度.图7(a)为不同脉冲能量下反射率随时间的变化,由于高激光通量条件下硅表面激发电子数密度增大,相应的瞬



时表面反射率急剧增大,对硅表面吸收的能量起到抑制作用,这与文献[18]图 2(d)中反射率的变化趋势相同,说明了仿真的正确性.图 8 为激光通量为  $0.5 \text{ J/cm}^2$  下不同脉宽下的最大电子密度分布图,入射激光脉宽越小意味着脉冲的峰值功率越大,瞬间内激发的电子数密度也越高,此时由于反射率的调制,最终损伤形貌接近椭圆形状.此外,等离子阈值模型相比于传统的温度模型时,省略了电子与晶格的耦合因子变化及电子逃逸时的能量损失,计算方面更加简单.在得到激光通量下相对应的等离子体阈值浓度硅损伤轮廓后,适当地增加入射光通量和较小脉冲宽度可以获得更为理想的初始烧蚀孔洞.

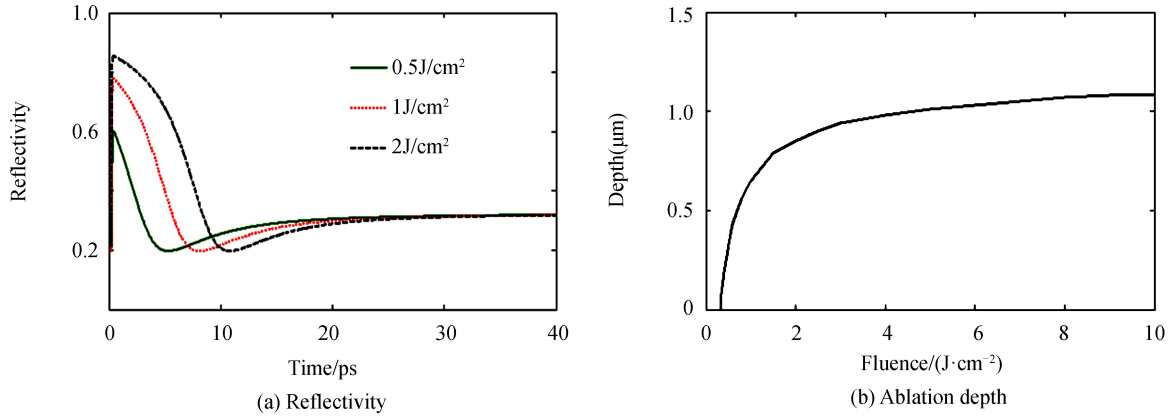


图 7 反射率和烧蚀深度随激光通量的演化

Fig.7 Evolution of reflectivity and ablation depth with laser fluence

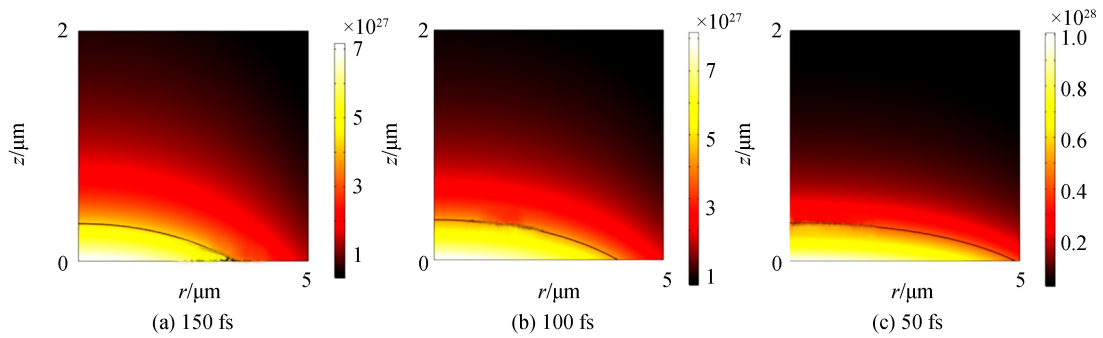


图 8 不同脉宽下的最大电子数密度分布

Fig.8 Maximum electron density distribution under different pulse width

### 3 不同初始孔洞结构对后续激光能量分布的影响

在飞秒激光打孔硅材料过程中,建立梯形模型( $x-z$  或  $y-z$  平面)近似模拟单脉冲激光打孔形成的孔洞结构,如图 9(左侧为单脉冲激光通量为  $5 \text{ J/cm}^2$  时的烧蚀结果),利用 FDTD 方法进行仿真,时间精度为  $0.1 \text{ fs}$ ,空间精度为  $0.02 \mu\text{m}$ .光源波长为  $800 \text{ nm}$ ,脉冲宽度为  $50 \text{ fs}$ .光源强度做归一化处理.本文所用激光光源重频为  $10 \text{ Hz}$ ,脉冲与脉冲之间的时间大于等离子体存在的时间,所以上一个脉冲产生的等离子体对下个脉冲的影响忽略不计.椭圆和圆偏振光束辐照的孔洞结构的  $x-z$  横截面可近似以梯形模型来表示,梯形上边长半径  $R=2.8 \mu\text{m}$ ,高度  $H=0.35 \mu\text{m}$ ,通过改变下边长半径  $r$  来调制孔洞结构,具体表现在入射光束与孔壁的夹角.

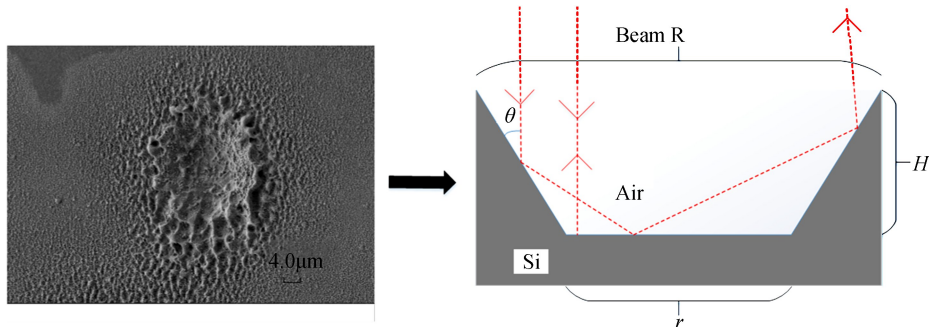


图 9 飞秒激光打孔硅过程中的孔状结构模型

Fig.9 Model of hole structure in process of femtosecond drilling silicon

单晶硅的反射率在波长 800 nm 时为 0.328,一部分光束被孔壁反射到底部,孔壁的反射对孔洞内的激光能量分布产生重要影响.文献[19]中,作者提出孔壁对激光诱导等离子体、激发电子密度和晶格温度的影响.在激光与物质相互作用过程中,等离子体的产生<sup>[20]</sup>难以避免,尤其是飞秒激光的高脉冲功率足够产生多光子电离.产生等离子体羽化后,等离子体通过轫致辐射被激光光束加热,等离子体是高通量脉冲激发出来的特殊气体,对激光有很强的吸收作用.理论上,孔底激光强度较大的区域易产生更多的等离子体,且等离子体的最高温度点大多出现在最大光强的位置<sup>[21]</sup>.

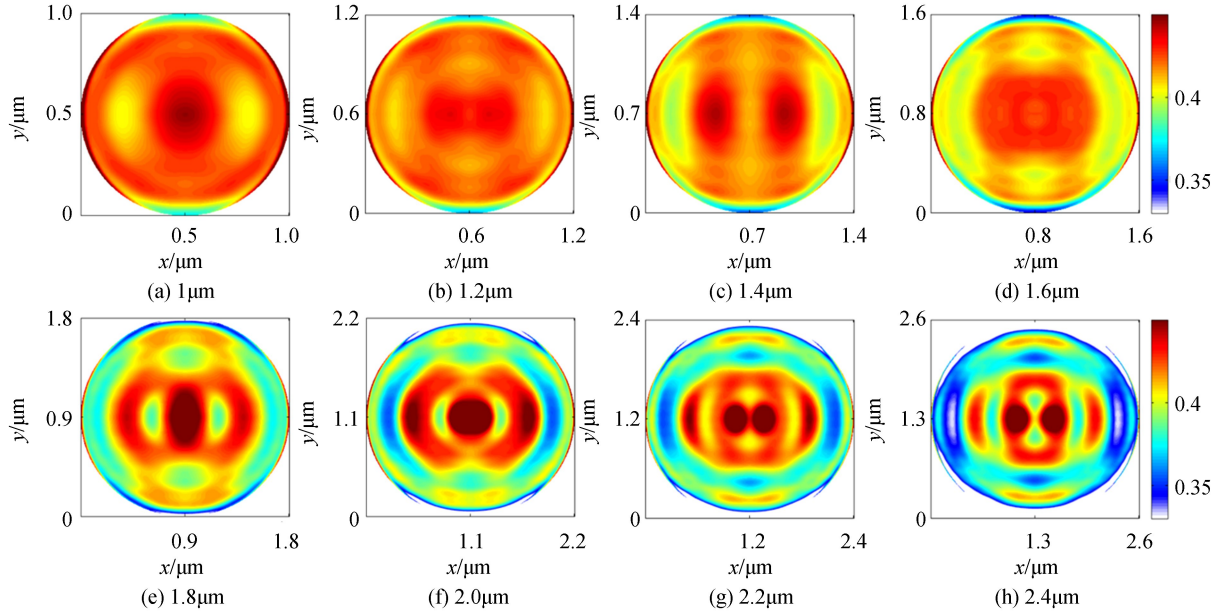


图 10 椭圆偏振光束辐照下不同尺寸孔底的光强归一化分布  
Fig.10 Laser intensity at different bottom ( $x$ - $y$  plane) of the micro-hole under the irradiation of elliptically polarized light beam

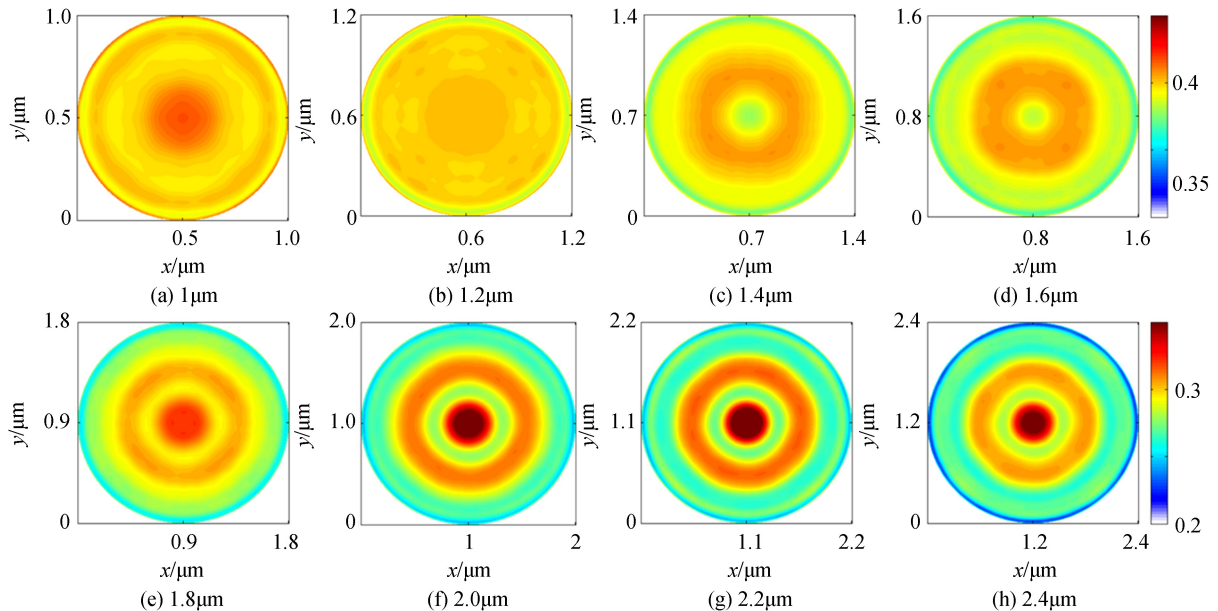


图 11 圆偏振光束辐照下不同尺寸孔底的光强归一化分布  
Fig.11 Laser intensity at different bottom ( $x$ - $y$  plane) of the micro-hole under the irradiation of circularly polarized beam

图 10 为  $x$ - $y$  平面椭圆偏振光束辐照在孔洞的能量分布图.梯形下边长半径  $r$  从  $0.8 \mu\text{m}$  到  $2.6 \mu\text{m}$ ,孔壁与入射光夹角  $\theta$  不断减小,激光强度分布变化剧烈且分布变得更加复杂.当激光束以与孔壁更小的夹角入射时,孔内中心区域将会聚焦更多能量;当夹角变大时,相当一部分能量被孔壁吸收或反射出孔内,导致聚焦在孔底中心的能量降低.由于光源光束为椭圆偏振光,孔内能量分布在偏振方向上强于其他方向.图 11 为  $x$ - $y$

平面上圆偏振光辐照孔洞的情况.可以发现底部的光强分布随入射角度夹角越小越集中于中心区域;从图 11 (a)到(d),由于孔壁的反射使得底部更多的光强分布呈环形而不在中心位置,造成底部更大的环形材料去除效果,在孔底形成局部环形结构.从图 11(e)到(h)除中心环形区域光强变大以外,中心区域能量也越来越强,这给孔底烧蚀形貌呈环形提供了理论依据,说明在激光烧蚀过程中,底部的烧蚀效果受到前一个脉冲辐照前孔洞结构的影响.图 12 为两种偏振态下最大光强随光强与孔壁夹角的演化图,孔底半径与夹角的关系由  $\theta = 2H/(R-r)$  得到,图中以下底半径表征光束与孔壁间的夹角大小.当光束与孔壁的夹角越小时,最大光强逐渐增大,但夹角达到约为 48.8 度和 55.1 度后,最大光强会呈下降趋势,这是由于孔壁反射到孔底中心区域的能量下降所致,但实际过程中单个脉冲的烧蚀截面近似于椭圆形,激光与孔壁的夹角很难达到这么小的情况即底边半径不可能达到接近于上边长,所以只需考虑图 12 曲线最大值前部分的变化趋势.此外可以发现,相比于圆偏振光,椭圆偏振光条件下孔内的电场强度分布更加复杂,但中心区域较为集中且最大电场强度值也更大,更易造成该范围内的材料去除,形成特殊形状的孔底烧蚀形貌.基于初始孔洞结构对脉冲能量分布的影响,增大初始光通量和减小脉宽使得形成的孔洞孔壁与入射激光夹角减小,进而得到更集中于中心的后续脉冲能量分布.通过对不同初始孔洞结构下激光强度分布位置的观察,为孔内等离子体的激发提供有价值的信息.

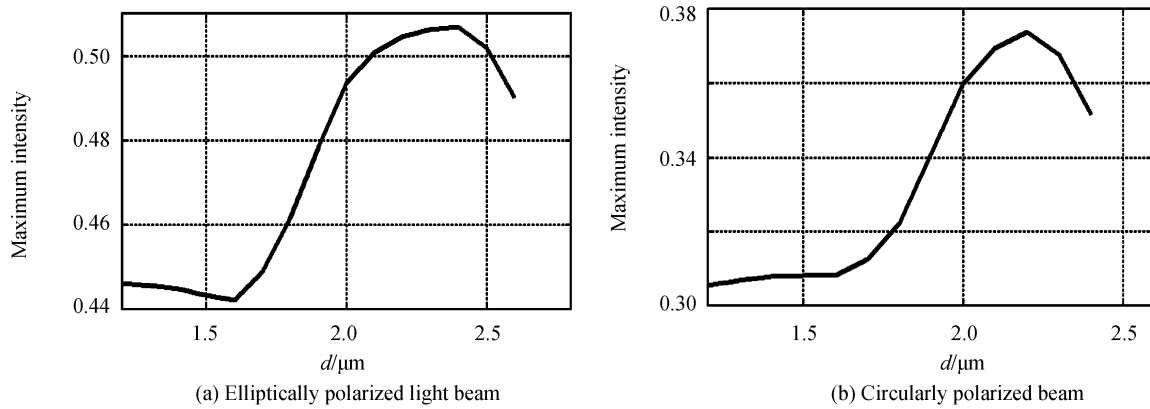


图 12 最大光强随孔底半径大小的演化

Fig.12 Evolution of maximum laser intensity with the radius of hole bottom

## 4 结论

本文基于单脉冲飞秒激光打孔硅的表面等离子体阈值模型及 FDTD 的方法说明了不同条件下激光辐照过程中形成的孔洞形貌对后续脉冲烧蚀效果的影响.结合改进的双温方程、德鲁德模型及等离子体阈值模型,得到非热损伤过程中飞秒激光诱导硅材料的最大自由电子数密度分布和阈值轮廓,并实验验证了等离子体阈值浓度得到损伤阈值的可行性;等离子模型可以较好地模拟不同入射激光通量烧蚀硅形成的弹坑截面形貌.当高激光入射通量辐照硅表面,激发的等离子体使得反射率将急剧升高,烧蚀的深度随入射激光通量增大并趋于稳定值导致烧蚀结构近似呈椭圆形.基于 FDTD 方法,在两种不同偏振态光束条件下,对初始脉冲烧蚀硅的孔洞对后续脉冲在孔内的能量分布影响进行了分析,当入射光束和孔壁的夹角越小,能量分布越集中,中心区域的最大电场强度和等离子体浓度也越大.结果说明激光通量越高,脉冲宽度越小,激光打孔效果越好,在加工领域如何更效率的激光打孔具有重要研究意义.

### 参考文献

- [1] JIANG Lan, Repeatable nanostructures in dielectrics by femtosecond laser pulse trains[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(87):151104.
- [2] ZHANG Yan-fei, WANG Lei-lei, GONG Jin-liang, Numerical simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of Ni-Ti alloy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(5):0514002.  
张彦斐, 王雷雷, 宫金良. 飞秒激光多脉冲烧蚀镍钛合金的数值模拟[J]. *光子学报*, 2016, **45**(5):0514002.
- [3] RETHFELD B, KAISER A, VICANEK M, *et al.* Ultrafast dynamics of nonequilibrium electrons in metals under femtosecond laser irradiation[J]. *Physical Review B*, 2002, **65**(21):392-397.
- [4] LENZNER M, KRÜGER J, SARTANIA S, *et al.* Femtosecond optical break down in dielectrics[J]. *Physical Review*

- Letters, 1998, **80**(18):4076-4079.
- [5] BONSE J, ROSENFELD A, KRÜGER J. On the role of surface plasmon polaritons in the formation of laser-induced periodic surface structures upon irradiation of silicon by femtosecond-laser pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **106**(10):104910.
- [6] LI Xing-wen, WEI Wen-fu, WU Jian, *et al.* The Influence of spot size on the expansion dynamics of nanosecond-laser-produced copper plasmas in atmosphere[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(24):6886.
- [7] JIAO Li-shi, NQ E Y, ZHENG Hong-yu, *et al.* Theoretical study of pre-formed hole geometries on femtosecond pulse energy distribution in laser drilling.[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(4):4927-4934.
- [8] JIANG Lan, TSAI H. 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.
- [9] STOIAN R, ASHKENASI D, ROSENFELD A, *et al.* Coulomb explosion in ultrashort pulsed laser ablation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [J]. *Physical Review B*, 2000, **62**(19):13167-13173.
- [10] BULGAKOVA N M, STOIAN R, ROSENFELD A, *et al.* A general continuum approach to describe fast electronic transport in pulsed laser irradiated materials: The problem of Coulomb explosion[C]. High-Power Laser Ablation. International Society for Optics and Photonics, 2005:345-356.
- [11] KORFIATIS D P, THOMA K A, VARDAXOGLU J C. Conditions for femtosecond laser melting of silicon [J]. *Applied Physics*, 2007, **40**, 6803-6808.
- [12] LADIEU F, MARTIN P, GUIZARD S. Measuring thermal effects in femtosecond laser-induced breakdown of dielectrics[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(6):957-959.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] HARB M, ERNSTORFER R, DARTIGALONGUE T, *et al.* Carrier relaxation and lattice heating dynamics in silicon revealed by femtosecond electron diffraction.[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2007, **110**(50):25308-25313.
- [16] DERRIEN T J, KRÜGER J, ITINA T E, *et al.* Rippled area formed by surface plasmon polaritons upon femtosecond laser double-pulse irradiation of silicon.[J]. *Applied Physics A*, 2014, **117**(1):77-81.
- [17] ZHANG Hao, WOLBERS S A, KROL D M, *et al.* Modeling and experiments of self-reflectivity under femtosecond ablation conditions[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, **32**(4):606-616.
- [18] GAN Yong, CHEN J K. Combinedcontinuum-atomistic modeling of ultrashort-pulsed laser irradiation of silicon[J]. *Applied Physics A*, 2011, **105**(2):427-437.
- [19] ZENG Xian-zhong, SAMUEL S M, LIU Chun-yi, *et al.* Plasma diagnostics during laser ablation in a cavity[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2003, **58**(5):867-877.
- [20] HWANG D J, GRIGOROPOULOS C P, CHOI T Y. Efficiency of silicon micromachining by femtosecond laser pulses in ambient air[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **99**(8):1706.
- [21] WANG Tie-jun, JU Jing-jing, WEI Ying-xia, *et al.* Longitudinally resolved measurement of plasma density along femtosecond laser filament via terahertz spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(5):863.