

文章编号: 0258-7025(2008)03-0462-04

激光功率密度对 Ge 烧蚀蒸气动力学特性的影响

吴东江¹ 许媛² 尹波¹ 王续跃¹

(¹ 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024; ² 黄山学院信息工程学院, 安徽 黄山 245021)

摘要 建立了一维半导体 Ge 激光烧蚀模型, 对不同功率密度的紫外激光烧蚀半导体 Ge 的过程进行了模拟, 并对计算结果进行了分析, 得到激光功率密度对烧蚀过程以及蒸气膨胀动力学特性的影响。结果表明, 激光功率密度的变化对烧蚀过程影响非常大。照射的激光功率密度越大, 靶的表面温度越高, 蒸发深度、烧蚀蒸气温度和膨胀的速度、相应蒸气膨胀的空间尺度也越大, 且等离子体屏蔽现象出现得越早。在给定的烧蚀条件下, 等离子体屏蔽的阈值在 $1 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 之间。

关键词 激光技术; 等离子体; 数值模拟; 脉冲激光烧蚀; 晶体 Ge

中图分类号 TN 249; O 411.3 **文献标识码** A

Dynamic Property Influence of Ge Plume with Laser Power Density

Wu Dongjiang¹ Xu Yuan² Yin Bo¹ Wang Xuyue¹

(¹ Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China
² School of Information Engineering, Huangshan University, Huangshan, Anhui 245021, China)

Abstract One-dimensional dynamic semiconductor model was presented. The model has been used to investigate the influence of different laser power density on the laser ablation and the expansion of plume. The laser ablation is greatly influenced by laser power density. The more intensive the laser power density is, the higher surface temperature it would have. In this case, the depth of evaporation, the temperature of vapor, and the expansion velocity and spatial scale of ablated plume will also increase with the rising of laser power density. Meanwhile the more intensive the laser power density is, the earlier the plasma shielding would appear. For the given conditions, the threshold of plasma shielding value is between $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ and $1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$.

Key words laser technique; plasma; numerical simulation; pulsed laser ablation; Ge crystal

1 引 言

硅(Si)、锗(Ge)等半导体材料作为 CMOS 电路、IC 芯片的核心材料, 在半导体光电集成领域具有十分重要的地位, 而脉冲激光烧蚀技术(PLA)作为一种最近发展起来制备纳米材料的高端技术, 在制备半导体纳米材料方面有着一定的技术优势和诱人的应用前景^[1,2]。由于它是一种新生技术, 存在一些有待解决的问题, 如出产率低, 纯度不够高, 制备的材料质量、性能不稳定, 对于制备大量的纳米材料存在烧蚀过程中的反向散射等问题, 该技术在很大程度上取决于烧蚀过程(激光参数、背景环境)和烧蚀产物的膨胀行为。了解脉冲激光烧蚀过程以及

激光参数对烧蚀过程的影响对于优化参数、提高加工质量是非常重要的。

因此, 对脉冲激光烧蚀半导体的过程和机制的研究, 对半导体纳米材料制备技术的进步和光电子学的发展有着重要的指导意义。但是, 用于制备纳米材料所用的激光脉宽非常短(ns~fs), 通过实验检测的手段很难得到烧蚀阶段烧蚀产物的动力学特性及演化过程。建立数值模型, 分析对脉冲激光烧蚀过程和烧蚀蒸气的动力学特性及演化过程成为一种最经济有效的方法^[3]。一些专家、学者对脉冲激光烧蚀过程提出了许多理论模型, 但是大多数模型是建立在研究脉冲激光烧蚀金属导体^[4~8]的基础上

收稿日期: 2007-09-05; 收到修改稿日期: 2007-11-01

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50290101)和辽宁省自然科学基金(20062178)资助课题。

作者简介: 吴东江(1964—), 男, 山东人, 教授, 主要从事精密与特种加工方面的研究。E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

的,对激光烧蚀半导体的过程及机制的研究却较少^[9]。本文建立了一维半导体烧蚀模型,研究激光功率密度对烧蚀过程以及烧蚀蒸气膨胀的影响。

2 理论模型的描述

物质对激光的吸收与其电子能带结构有关,对不同类型(导体、半导体、绝缘体)的材料,激光烧蚀机制也不相同。Ge 的禁带宽度为0.67 eV,对于波长为248 nm的激光,其光子能量为5 eV,远远大于 Ge 的禁带宽度,能直接激发 Ge 的价带电子向导带跃迁,本文利用 Ge 的各向同性以及其电子电离能级分布与金属导体非常相似的特点,在 Zhaoyang Chen 等提出的金属导体激光烧蚀模型^[6]的基础上发展了一维半导体激光烧蚀模型,对波长为248 nm 的高斯型脉冲激光烧蚀晶体 Ge 和烧蚀蒸气在背景气体(He)环境下膨胀的动力学行为进行模拟。

对于纳秒脉冲激光烧蚀,激光脉冲宽度远大于电子与离子间的能量弛豫时间,可以认为材料处于局域热力学平衡状态,用一维单温的热传导方程来描述激光与材料的相互作用。当 Ge 靶表面温度上升到气化温度时,表面将出现气化现象,烧蚀蒸气在背景气体环境下膨胀。膨胀初期阶段,假设蒸气是

处在局域热力学平衡下的连续性介质,用一维的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程组来描述。模型中,只考虑 Ge 的一阶、二阶电离,He 的一阶电离,处于热力学平衡状态下蒸气的电离度可通过沙哈方程估算。对于紫外激光烧蚀过程,激光等离子体吸收入射激光能量的主要机制是逆韧致吸收机制和原子激发态的光致电离吸收机制,而逆韧致吸收又分为电子-离子碰撞吸收和电子-中性粒子碰撞吸收。详细模型和有关参数的计算公式可以参考文献^[6]。

3 计算结果与分析

为了分析激光功率密度对烧蚀过程的影响,对波长为248 nm,峰值功率密度分别为 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, $1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, $2.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, $3.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, $4.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 和 $5.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 的高斯型(半峰全宽为7 ns)脉冲激光在133.3 Pa氦气环境下烧蚀晶体 Ge 的计算结果进行分析。

3.1 激光功率密度对等离子体屏蔽的影响

脉冲激光照射在晶体 Ge 表面,Ge 被迅速地加热熔化蒸发,当激光功率密度足够高时,蒸气会发生电离,形成等离子体向外膨胀。在膨胀过程中等离子体吸收激光能量,无形中阻止了激光到达靶面,切

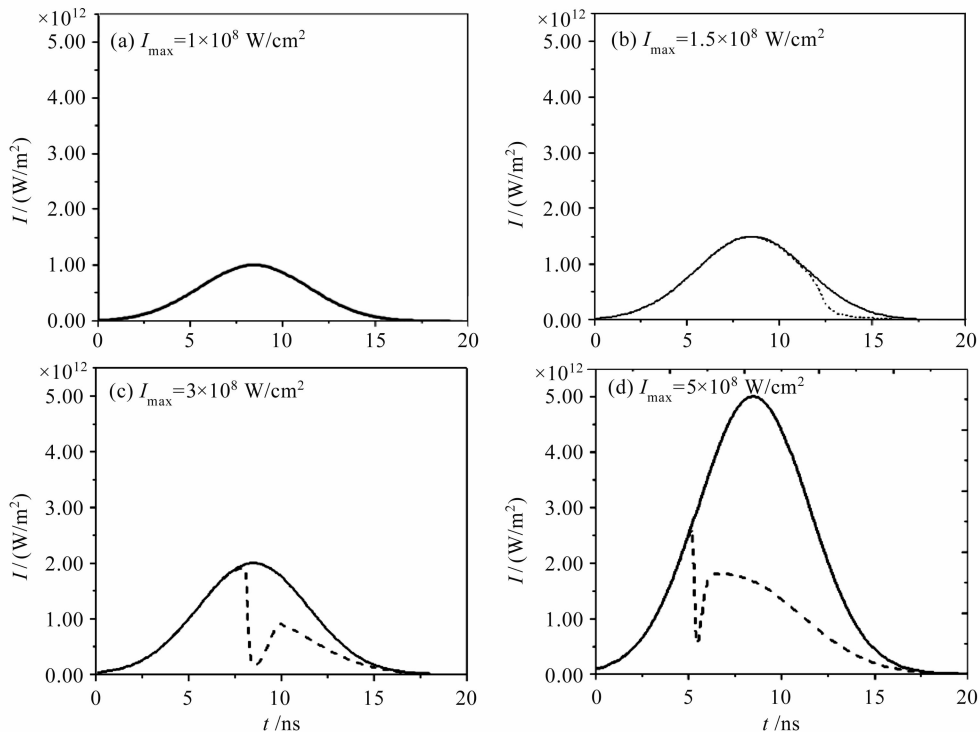


图1 脉冲激光功率密度随时间变化曲线(实线)和到达靶面的激光功率密度随时间变化的曲线(虚线)

Fig. 1 Laser intensity-time profiles for different values of laser irradiance. The solid line represents the original laser pulse and the dashed lines represent the calculated laser intensities arriving at the target, after passing through the plasma

断了激光与靶的能量耦合,即出现等离子体屏蔽现象。因此,实际与靶作用的激光,是穿过蒸气层后的激光束。图 1 给出了不同峰值功率密度的激光脉冲,其初始的功率密度随时间的变化(实线)以及穿过蒸气层到达靶面的功率密度随时间的变化(虚线)。如图所示,峰值功率密度为 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 的激光脉冲烧蚀 Ge 靶时,没有发生等离子体屏蔽现象。说明此时烧蚀蒸气就像一层薄的透明介质,激光束穿过蒸气不发生衰减。当脉冲的峰值功率密度提高为 $1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,在 12 ns 时出现了等离子体屏蔽现象,但屏蔽现象不明显,说明蒸气对激光能量的吸收很小。当脉冲的峰值功率密度为 $3.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,在 8 ns 左右出现了等离子体屏蔽现象;当脉冲的峰值功率密度为 $5.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,在 5 ns 左右就出现等离子体屏蔽现象。由此可见,激光功率密度越高,屏蔽现象出现越早,且在上述给定的条件下,等离子体屏蔽的阈值在 $1 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 之间。

3.2 激光功率密度对靶面温度和蒸发深度的影响

图 2(a),(b)分别描述了图 1(a),(c),(d)所示的激光脉冲烧蚀晶体 Ge,靶面温度和蒸发深度随时间的变化。当激光脉冲峰值功率密度为

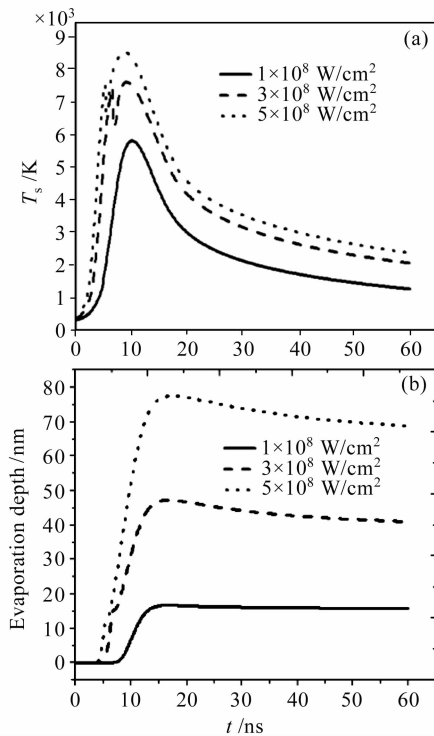


图 2 激光功率密度对靶面温度(a)和蒸发深度(b)的影响

Fig. 2 Calculated target surface temperature (a) and evaporation depth (b) at different laser irradiances

$1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,靶面在 10 ns 左右达到最高温度 5700 K;当激光脉冲的峰值功率密度提高到 $3 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,靶面在 10 ns 之前就达到最高温度 7500 K;当激光脉冲的峰值功率密度为 $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,靶面在更短时间内达到最高温度 8500 K。且在相同时刻,功率密度较高的激光脉冲照射靶面,得到的表面温度较高。由此得出,激光功率密度越大,靶面温度就越高,并且达到最高温度所用时间越短。

在模型中,认为当温度达到气化温度时,材料就被蒸发去除,所以蒸发深度也是烧蚀深度。从图 2 (b)看出,当峰值功率密度为 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 的脉冲激光烧蚀 Ge 时,蒸发深度为 15 nm;当脉冲峰值功率密度提高到 $3 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,蒸发深度为 40 nm;当脉冲峰值功率密度提高到 $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,蒸发深度达到 70 nm。由此可见,照射的激光功率密度越大,蒸发深度也越大。

3.3 激光功率密度对蒸气膨胀的影响

图 3(a),(b)分别描述了图 1(a),(c),(d)所示的激光脉冲烧蚀晶体 Ge,17 ns 时刻烧蚀蒸气的温度和膨胀的速度的空间分布。由图可知,当激光峰值功率密度为 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,烧蚀蒸气的温度只

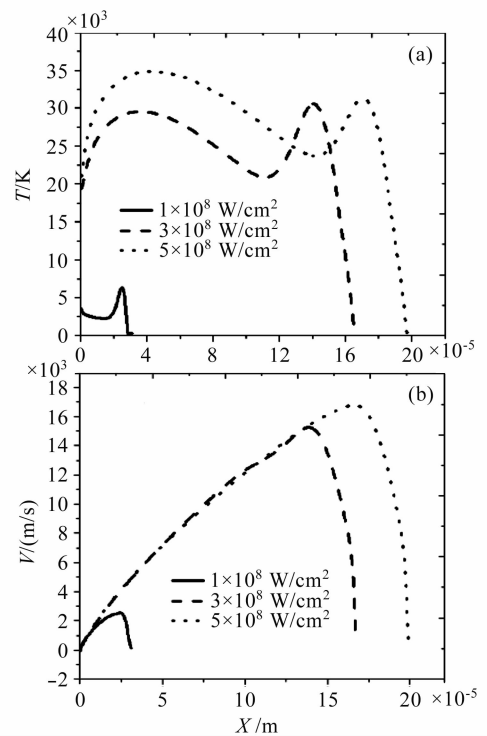


图 3 17 ns 时刻激光功率密度对烧蚀蒸气温度(a)和膨胀速度(b)的影响

Fig. 3 Calculated plume temperature (a) and expansion velocity (b) at different laser irradiances

有几千开;当激光峰值功率密度提高到 $3 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,烧蚀蒸气的温度达到 $20000 \sim 30000 \text{ K}$ 之间;当峰值功率密度提高到 $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,烧蚀蒸气的温度达到 $25000 \sim 35000 \text{ K}$ 之间。由此得出,激光功率密度越高,烧蚀蒸气的温度也越高。

从图 3(b)可以看出,在同一时刻,当激光峰值功率密度为 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,烧蚀蒸气膨胀的最大速度只有 2000 m/s ;当峰值功率密度为 $3 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,蒸气膨胀的最大速度达到 15000 m/s ;当峰值功率密度达到 $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 时,蒸气膨胀的最大速度达到 17000 m/s 。由此得出,激光功率密度越高,烧蚀蒸气膨胀的速度越大。

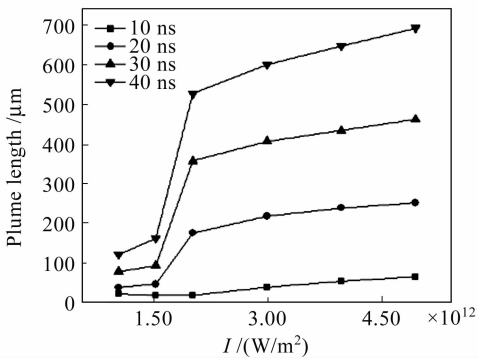


图 4 烧蚀蒸气膨胀的空间尺度随激光功率密度的变化

Fig. 4 Calculated plume length as a function of laser irradiance

图 4 描述了烧蚀蒸气膨胀的空间尺度随激光功率密度的变化。如图所示,10 ns时,激光功率密度的变化对烧蚀蒸气膨胀的空间尺度影响并不明显,虽然不明显,但仍然能观察到烧蚀蒸气的膨胀尺度随激光功率密度增大而增大的趋势,随着时间的推移,变化趋势更加明显。由此可知,蒸气膨胀的空间尺度随激光功率密度增大而增大,且膨胀的时间越长变化趋势越明显。

4 结 论

在紫外激光脉冲与半导体 Ge 相互作用基本理论的基础上,建立了一维的半导体烧蚀模型。对不同条件下的烧蚀过程($\lambda = 248 \text{ nm}$, 峰值功率密度分别为 $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, $1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, $2.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, $3.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, $4.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, $5.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, 半峰全宽为 7 ns 的高斯型脉冲在

气压为 133.3 Pa 的氦气环境下)进行模拟,并对计算结果进行分析,得到不同激光功率密度对激光烧蚀过程以及烧蚀蒸气动力学特性的影响,结论如下:

1) 激光功率密度的变化对烧蚀过程影响很大。照射的激光功率密度越大,靶的表面温度越高,蒸发深度越大;

2) 激光功率密度越大,烧蚀蒸气的温度和膨胀的速度越大;

3) 照射的激光功率密度越大,等离子体屏蔽现象出现越早。在上述给定的烧蚀条件下,等离子体屏蔽的阈值在 $1 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 之间。

参 考 文 献

- Lou Qihong, Zheng Jun, Wei Yunrong *et al.*. Synthesis of nanometer crystal and semiconductor compound powders by excimer laser ablation [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(1):85~88
楼祺洪,郑隽,魏运荣等. 利用准分子激光制备晶体和半导体的纳米粒子[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(1):85~88
- Fu Guangsheng, Chu Lizhi, Zhou Yang *et al.*. Influence of pulse repetition rate on morphology of nanocrystalline silicon film prepared by pulsed laser deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1254~1257
傅广生,褚立志,周阳等. 激光脉冲频率对纳米 Si 晶薄膜形貌的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1254~1257
- Li Xiaoxi, Jia Tianqing, Feng Donghai *et al.*. The ablation mechanism and ultra-fast dynamics property of LiF with the ultra-short pulse laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11):1526~1530
李晓溪,贾天卿,冯东海等. 超短脉冲照射下氟化锂的烧蚀机理及其超快动力学研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11):1526~1530
- Danny Perez, Laurent J. Lewis. Ablation of solids under femtosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. Letts.*, 2002, **89**(25):255504-1~255504-4
- M. Aden, E. Beyer, G. Herziger. Laser-induced vaporisation of metal as a Riemann problem [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1990, **23**:655~661
- Zhaoyang Chen, Annemie Bogaerts. Laser ablation of Cu and plume expansion into 1 atm ambient gas [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(6):063305-1~063305-12
- Zhaoyang Chen, Davide Bleiner, Annemie Bogaerts. Effect of ambient pressure on laser ablation and plume expansion dynamics: A numerical simulation [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**(6):063304-1~063304-9
- Annemie Bogaerts, Zhaoyang Chen. Effect of laser parameters on laser ablation and laser-induced plasma formation: A numerical modeling investigation [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2005, **60**(9-10):1280~1307
- Xu Yuan, Wu Dongjiang, Liu Yue. Numerical simulation on plasma characteristics of Ge ablated by pulse laser [J]. *High Power Laser and Particale Beams*, 2007, **19**(9):1561~1566
许媛,吴东江,刘悦. 脉冲激光烧蚀 Ge 产生等离子体特性的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(9):1561~1566