

皮秒激光-化学复合法制备高效减反射晶硅表面微结构研究

吕晓占 季凌飞 吴 燕 林真源 闫胤洲

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 基于皮秒激光的“冷加工”特点,进行了用皮秒激光辐照结合快速化学腐蚀(NaOH溶液:质量分数为4%,不大于3 min,80 ℃水浴)调控工艺制备高效减反射晶硅表面微结构的研究,在400~1000 nm波长的宽光谱范围内,获得了微-纳双结构微孔阵列和圆顶锥形周期性阵列两种减反射表面,前者的平均反射率低于5%,后者的平均反射率低于10%。制备过程中工艺可控性强,无需掩膜和真空环境。研究了激光工艺参数和化学腐蚀参数的不同调控匹配在微结构单元形成中的作用机制,分析了所制备表面微结构的减反射机理,为太阳能电池和其他半导体器件中硅基减反射表面微结构的低成本激光可控制制造提供了重要的指导。

关键词 激光技术;皮秒激光;功能表面微结构;高效减反射;晶硅

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0403006

Fabrication of High Performance Anti-Reflection Silicon Surface by Picosecond Laser Scanning Irradiation with Chemical Corrosion

Lü Xiaozhan Ji Lingfei Wu Yan Lin Zhenyuan Yan Yinzhou

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Based on the “cold processing” property of picosecond laser, the investigation on the hybrid technique using picosecond laser irradiation followed by short-time chemical corrosion (NaOH solution, mass fraction: 4%, less than 3 min, water bath: 80 ℃) to fabricate high performance silicon antireflection textures is carried out. Over a broad wavelength range of 400~1000 nm, the average reflectance of the two fabricated novel surface textures, which are the micro-nano hierarchical structure texture and the dome-cone array texture, both reduce to below 10%. Even the average reflection of the former reduces to below 5%. The fabrication can be carried out with high controllability and without using the etch mask and vacuum circumstance. The mechanism of different regulation matching of the laser process parameters and chemical corrosion parameters acting on the formation of the novel antireflection textures is studied. The antireflection mechanism of the textures is also analyzed. Results provide an important guide for laser fabrication of high performance silicon antireflection textures for the application in solar cells and other semiconductor devices in a low-cost and controllable way.

Key words laser technique; picosecond laser; functional surface microstructure; high-performance antireflection; crystalline silicon

OCIS codes 140.3610; 350.6050; 040.6040

1 引 言

具有减反射功能的晶硅表面微结构在太阳能电池、平板显示、光发射二极管、激光器等现代光电器件的

收稿日期: 2014-10-30; 收到修改稿日期: 2015-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(51275011)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0007)、北京市教育委员会科技计划(KZ20131005005)

作者简介: 吕晓占(1987—),男,硕士研究生,主要从事半导体材料激光加工方面的研究。E-mail: xiaozhan_lv@126.com

导师简介: 季凌飞(1971—),女,教授,博士生导师,主要从事非金属材料激光制造科学与技术等方面的研究。

E-mail: ncltji@bjut.edu.cn(通信联系人)

制造中具有重要的应用价值^[1-2],具有降低器件的表面反射损耗,提高光电转换效率等功能。尤其是在太阳能电池的绒面层的应用上,尽可能提高对太阳光能量的吸收已成为当前硅基太阳能电池技术升级的主要任务,也是众多太阳能电池产业机构发展所面临的重大技术难题。已有研究表明,在太阳光谱光子最为密集的波段(400~700 nm),有超过30%的光能会被未经表面处理的裸露硅表面反射回大气^[3],大大降低了电池的短路电流和转换效率。因此,需要对硅表面进行低反射率的表面微结构制备,以增加光在传输过程中的散射作用,通过延长光程,把那些进入膜内的光子,尽可能地限制在电池内部,达到最有效利用光能的目的。

晶硅表面减反射微结构的常用制备方法为湿式化学织构法^[4-6]。由于晶面和晶向原子排列的不同,当晶硅材料受到化学腐蚀时,(331)晶面的腐蚀速率最快,而(111)面腐蚀速率最慢,因而最终得到由(111)面包围而成的“金字塔”型角锥体表面织构,织构单元随机分布。湿式化学织构法具有规模化量产的特点,但是无法控制织构单元的形貌、尺寸和分布,制约了光反射率的进一步降低,该类减反膜的反射率通常高于10%^[7-8],难以满足一些新型光电器件的制备要求。且湿式化学法处理过程中的微粒成分必须为水溶性,否则极易对形成的表面微结构引入杂质干扰。随着激光制造技术的不断发展,激光在光学器件^[9-11]、光电器件^[12-17]等方面的研究也越来越广泛,其中利用激光制备硅基减反射表面微结构的方法也愈发受到人们的关注^[14-17]。2010年中山大学沈辉等^[18]采用半导体抽运Nd:YAG脉冲激光器刻蚀多晶硅片表面,获得了最佳反射率达10%的实验结果,该研究进一步预测了获得30 μm以下的结构尺寸将有利于进一步提高减反射表面的反射率,采用单模和更短波长的激光是值得尝试的途径。2012年多伦多大学的Kumar等^[17]将飞秒激光直写技术、掩膜法与化学腐蚀法相结合,利用522 nm飞秒激光刻蚀沉积于晶硅表面的SiN_x层,获得所需的掩膜图案,再加以KOH溶液腐蚀,并采用HF酸去除SiN_x介电掩膜层从而获得所需的倒金字塔表面微结构。1998年,哈佛大学Mazur小组利用飞秒激光对单晶硅(100)面进行辐照研究^[19],在SF₆气体氛围下,获得了准规则排列的微米级尖峰结构,这种结构具有十分优异的减反射特性,在紫外到中红外波段的吸收率超过90%。所制备的硅表面在可见光范围内呈全黑状态。中国计量科学研究院李平等^[20]同样在SF₆气体氛围中,采用皮秒和飞秒脉冲激光辐照单晶硅,获得了相似的尖峰结构,并对结构的演化过程进行了分析。这种在含硫气氛中采用超短脉冲激光辐照硅材料获得尖峰结构减反射表面的研究近年来得到较为普遍的开展,制备过程首先需要真空度较高的真空环境,并充入通过微型系统进行精密控制的SF₆背景气体,气压值一般达500 Torr时方可进行硅基尖峰微结构的制备,反应产物中会包含有H₂S等有毒气体^[21],该技术目前主要见于实验室研究。介于飞秒-纳秒之间具有“跨界”性质的皮秒(1~10 ps)脉宽时域,形成了皮秒激光对材料作用极为丰富的机制和效应^[22],相对于飞秒激光,皮秒激光作为一种超短脉冲激光具有节约成本和运行环境要求更低的特点,具有更强的工程应用前景^[23]。

本文研究了皮秒激光辐照结合短时间(不大于3 min)化学腐蚀的双重调控工艺(皮秒激光-化学复合法)制备高效减反射晶硅表面微结构技术,获得了微-纳双结构孔阵列和圆顶锥形周期性阵列两种新型的硅基表面微结构,在未镀减反膜的情况下,两种结构的平均反射率在400~1000 nm波长的宽光谱范围内分别约为5%和7%,具有优异的宽光谱减反射特性。该技术制备环境开放、灵活,结构单元通过调控皮秒激光工艺参数得到的微米孔或“V”形槽来定位,制备过程无需掩膜,无需昂贵的光刻工艺和真空环境,在提高工艺可控性的同时也大大降低了制备成本,使得这种基于皮秒激光辐照而制备的宽光谱高效减反射表面微结构具有量产化的发展潜质。

2 实验方法

实验材料为半导体工业中的常规220 μm厚p型(100)硅片。所用激光辐照加工系统由如图1所示的激光器、导光系统,控制电脑、振镜和加工平台组成,其中激光器为德国Edgewave公司生产的1064 nm波长的皮秒激光器,脉宽小于20 ps,光束质量因子 $M^2 < 1.3$ 。激光束经振镜聚焦垂直辐照到置于加工平台上的硅片表面(辐照光斑直径 $d=40 \mu\text{m}$),于加工平台的XY平面内进行扫描加工;激光器的开关光、振镜及与加工平台运动的匹配由电脑软件编程控制;通过调控激光工艺参数、光束扫描路径和扫描次数等进行硅表面微结构的制备工艺优化。激光扫描制备的微结构样品经质量分数为10%的HF酸简单去损伤漂洗处理,再浸入热

碱溶液进行快速腐蚀,最终获得具有宽光谱波段内低平均反射效应的晶硅表面微结构。实验中所用热碱溶液的配比:NaOH的质量分数为4%,乙醇的质量分数为17.5%,蒸馏水:余量。水浴加热温度约为80℃。

使用OLYMPUS公司的激光扫描共聚焦显微镜LSCM(OLS3100)和FEI公司的电子扫描显微镜SEM(QUANTA FEG)进行硅表面微结构的观察分析。硅片反射率采用岛津公司的UV-3600分光光度计测量,测量波长范围:300~1100 nm。

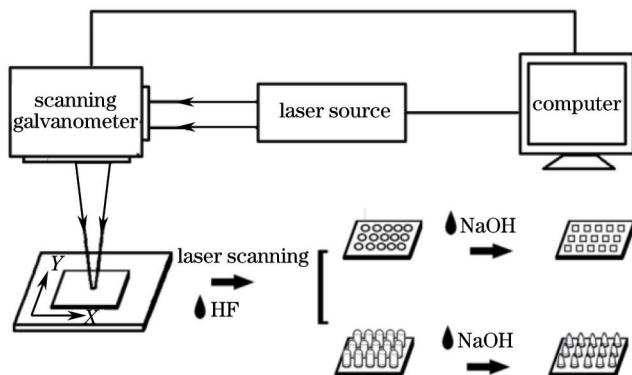


图1 激光加工系统及实验流程示意图

Fig.1 Schematic of the picosecond laser processing system and the experimental process

3 结果与讨论

3.1 微-纳双结构孔阵列表面微结构

经前期实验预研,设定激光功率为9 W,频率为100 kHz、扫描速率为800 mm/s;根据激光扫描路径接近辐照光斑尺寸($d=40\ \mu\text{m}$)的原则,初步设定激光扫描路径为间距 $n=20、30、40\ \mu\text{m}$ 的系列密排直线,当光束完成第一条单线重复扫描次数 m 时,激光关光,同时移到下一相邻间距为 n 的扫描路径起始端,开光扫描。按此过程逐条完成后续密排直线的路径辐照。实验发现,当单线重复扫描次数 m 在55~90次之间时,不同扫描间距 $n=20、30、40\ \mu\text{m}$ 时都可获得硅表面上的微米孔分布,如图2所示。对比发现,20 μm 扫描间距形成的微米孔形状及分布杂乱,有明显的微孔间贯通损伤;而当扫描间距为30 μm 时,可以获得孔径、孔深都比较均匀规则的微米孔分布;继续增大扫描间距到40 μm 时,由于间距过大,单排微米孔的排与排之间留有较多的平滑区域,入射光在此会发生较强反射,不利于硅表面减反射率的降低。因此实验中选取30 μm 为皮秒激光辐照制备微米孔的优化扫描间距。在实验时发现,当光斑直径一定时,在特定的单脉冲能量和光斑重叠率下(30 μm 扫描间距时,对应光功率为9 W、频率为100 kHz、扫描速率为800 mm/s、扫描次数为85次),才会出现均匀的锥孔阵列,因此在保证以上两个参数不变的情况下,提高激光器功率就可以成比例地提高脉冲频

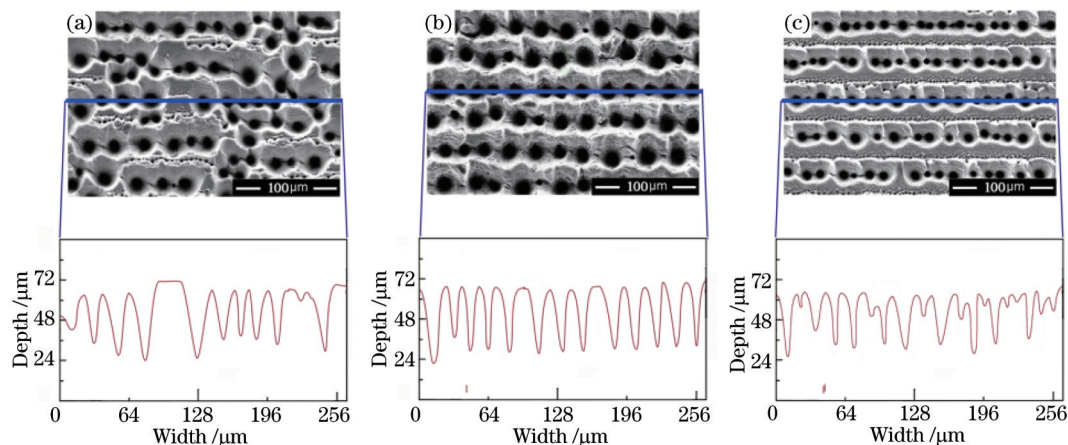


图2 不同扫描间距 n 下激光扫描样品的显微形貌图。(a) $n=20\ \mu\text{m}$; (b) $n=30\ \mu\text{m}$; (c) $n=40\ \mu\text{m}$

Fig.2 SEM and LSCM images of the sample surfaces processed with different laser scanning intervals n .

(a) $n=20\ \mu\text{m}$; (b) $n=30\ \mu\text{m}$; (c) $n=40\ \mu\text{m}$

率,从而提高扫描速率,如:将功率设为 90 W,可将扫描速度提高到 8000 mm/s。但由于实验条件限制,采用的激光扫描振镜最大只能承受 10 W 的入射激光功率,因此采用 9 W 的入射功率,此时可以获得均匀锥孔阵列的最大扫描速度为 800 mm/s。在工业生产中可大幅提高激光器功率,来获得更高的扫描速率,以适应制备大面积样品。

当扫描间距 $n=30\ \mu\text{m}$ 时,不同单线扫描次数 m 时的硅表面显微形貌演变如图 3 所示。当扫描重复次数为 80~110 次时,可以得到均匀分布的微米孔,图 3(c)所示为扫描次数 $m=85$ 次时,硅表面所形成的均匀密集的微米孔分布。减少扫描次数至 80 以下,微孔分布将变得稀疏直至无法形成,如图 3(a),(b)所示;而当扫描次数超过 110 次时,微孔分布会受到破坏,在硅表面形成激光刻蚀常见的平行“V”形槽阵列,如图 3(d)所示^[18]。

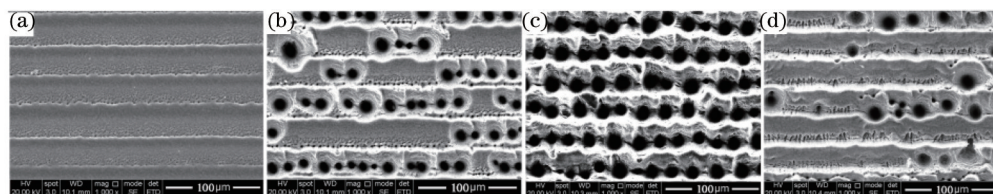


图 3 扫描间距 $n=30\ \mu\text{m}$ 时不同扫描次数 m 下样品的 SEM 图。(a) $m=20$; (b) $m=60$; (c) $m=85$; (d) $m=140$

Fig.3 SEM images of the sample surfaces prepared with different laser scanning times m when $n=30\ \mu\text{m}$.

(a) $m=20$; (b) $m=60$; (c) $m=85$; (d) $m=140$

对在扫描间距 $n=30\ \mu\text{m}$ 、单线扫描次数 $m=85$ 次的优化工艺条件下获得的样品进行进一步的显微形貌分析如图 4 所示,可见皮秒激光超短脉冲的加工优势在该类微孔的制备上得到了充分体现,微孔分布均匀、密集,孔边缘及周围区域无熔融残渣及裂纹分布,为后续化学腐蚀的定位控制提供了很好的制备基础。图 4(a)中左上角小图为微孔单元的纵剖面 SEM 图,显示微孔单元呈锥形,轴向垂直于晶硅表面,结合图 4(b)分析,获得微孔尺寸信息:平均孔径为 $25\sim 30\ \mu\text{m}$,平均孔深为 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 。调控皮秒激光的工艺参数、扫描路径及扫描次数可以对微孔/槽的形成和分布进行有效控制,具有高质量“冷加工”效果的微孔十分有利于后续化学腐蚀效果的控制。

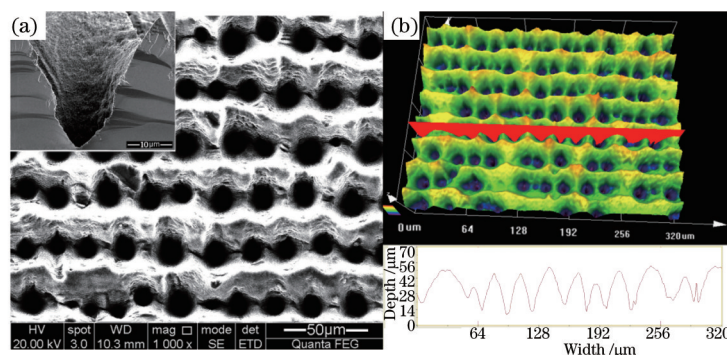


图 4 扫描间距为 $30\ \mu\text{m}$ 、扫描次数为 85 次的微米孔显微形貌。(a) SEM 图; (b) LSCM 图

Fig.4 Surface morphology of the micro-holes processed with laser scanning interval of $30\ \mu\text{m}$ and scanning times of 85.

(a) SEM image; (b) LSCM image

基于皮秒激光对材料的辐照作用机制,分析上述微米孔形成的主要原因。1064 nm 波长激光的光子能量为 1.17 eV,大于硅的带隙能量 1.12 eV(温度为 300 K 时),当聚焦的皮秒激光束入射到硅片表面时,硅材料将有很大的本征吸收,导致大量能量产生并储存于材料表面的载流子中,随后通过“电子-声子”的能量传递过程,由载流子传递给晶格。当这种能量的传递和积累与晶硅相爆炸条件(高于 $0.9T_c$, $T_c=7925\ \text{K}$,为硅的热力学临界温度^[24])匹配时,引起晶硅表面电离态的爆炸性飞溅,并伴随爆炸应力将材料抛飞出去,留下点状刻蚀于晶硅表面。随着激光扫描次数的增加,由点状刻蚀演变为坑状刻蚀,最终形成微米孔分布。虽然材料对 1064 nm 波长激光的入射比短波长激光具有更深的吸收深度,使得入射激光能量能在深达数微米的更深处被吸收和积累,但由于所用皮秒激光的脉冲宽度小于 20 ps,与硅的“电子-声子”弛豫时间接近,因此激光脉冲作用时,大部分能量会用于材料的电离而非热传导,并通过电离化的材料而耗散,减小了激光作用于晶

硅表面的热影响,有效抑制激光辐照对硅表面微孔阵列的热损伤及熔凝物等热作用效应。

图5所示为上述皮秒激光辐照所制备的微米孔结构(图4)经热碱溶液腐蚀而获得的一种新型微-纳双结构孔阵列,测试发现,该表面结构在400~1000 nm波长范围内的最低反射率可达3%。在微-纳双结构微孔阵列中,原皮秒激光扫描制备的微孔因热碱溶液腐蚀的各向异性,已从圆形孔转变为方形孔,如图5(a)所示;进一步放大微孔单元,如图5(b)所示,可发现方孔内壁及边缘出现了纳米级阶梯状精细结构,阶梯宽度平均约数百纳米。从图5(c)的方孔单元截面图可以看到,纳米级精细结构由生长在孔壁上的高约数百纳米层状金字塔型小突起构成。由于小金字塔呈层状分布的孔壁与微孔轴向有一定角度,因此从轴向观测则显示为纳米级阶梯状结构。

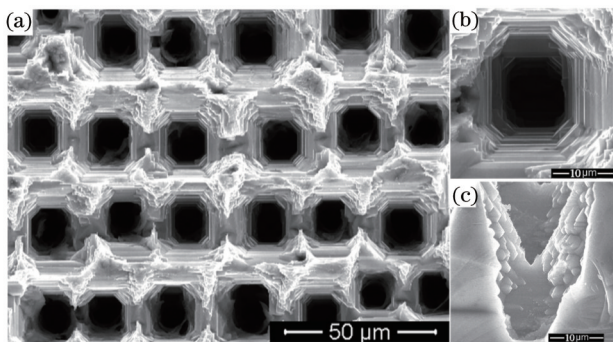


图5 微-纳双结构孔阵列SEM图。(a) 俯视图;(b) 单元细节图;(c) 单元截面图

Fig.5 SEM images of the holes with micro-nano hierarchical structure. (a) Top view; (b) structure details of the hole; (c) cross section view of the hole

对于不同热碱溶液腐蚀时间的微-纳双结构孔阵列晶硅表面进行反射率测试,如图6所示,发现对硅表面反射率的提高,存在最优化学腐蚀时间。

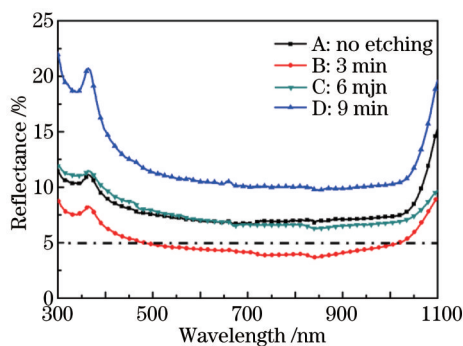


图6 不同化学腐蚀时间微-纳双结构样品的反射率

Fig.6 Surface reflectance of the samples fabricated with different chemical corrosion times

图6所示,具有最低反射率的减反射晶硅样品为经3 min腐蚀后的样品B,在450~1000 nm的波长范围内,样品B的平均反射率小于5%,最低约为3%;SEM显微形貌显示,该样品结构单元的微孔壁上生长有大量的纳米级阶梯状精细结构,如图7(a)所示。延长腐蚀时间超过3 min后,样品反射率随腐蚀时间的增长而逐渐提高,经6 min腐蚀的样品C的平均反射率与未经腐蚀的样品A的平均反射率相当,为8%左右;此时孔壁上

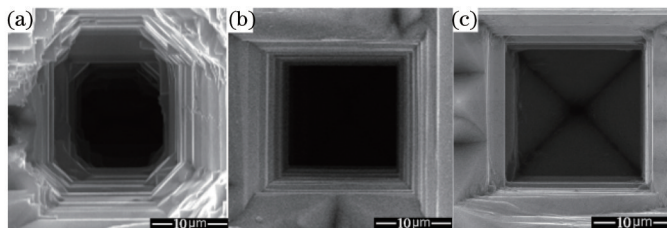


图7 不同腐蚀时间微孔单元的SEM图。(a) 3 min;(b) 6 min;(c) 9 min

Fig.7 SEM images of the holes fabricated with different chemical corrosion times. (a) 3 min; (b) 6 min; (c) 9 min

纳米阶梯结构亦逐渐减少,如图7(b)所示。当腐蚀时间延长至9 min时,样品D的反射率已大于10%,图7(c)中SEM显微分析中显示,该样品微孔壁中的纳米级精细结构已几近消失。

基于对图4、图5和图7所示显微结构的分析,采用有限差分时域法(FDTD)建立简化的单元模型,模拟计算微孔中纳米级精细结构对光吸收的影响。设定单元模型结构中的纳米阶梯结构尺寸为400 nm,顶角为110°,平面光场沿z轴负方向入射到孔内,光沿x轴偏振,网格计算精度为8 nm×8 nm×8 nm,模拟计算了800 nm波长的入射光在两种结构中的电场耦合情况如图8所示。模拟计算结果显示在没有纳米级精细结构的微孔中,如图8(a)所示,只有当入射光深入微孔中部以下的深度时,才会发生光耦合吸收效应,因此这种结构中光反射率的降低主要依靠孔壁的多次反射、散射及吸收来实现。而对具有纳米级精细结构的微孔,如图8(b)而言,除了依靠孔壁的反射、散射进行减反之外,孔壁上的纳米级结构会直接引发光耦合吸收效应,即使在微孔开口边缘也会因这种光耦合效应为提升材料表面的减反射率做贡献,从而获得可低至3%(入射波长为800 nm)的极低反射率。这种微-纳双结构孔阵列是传统制备方法所不具有的,其形成机理、光吸收机制以及制备工艺的精控研究都值得开展更深入的工作。

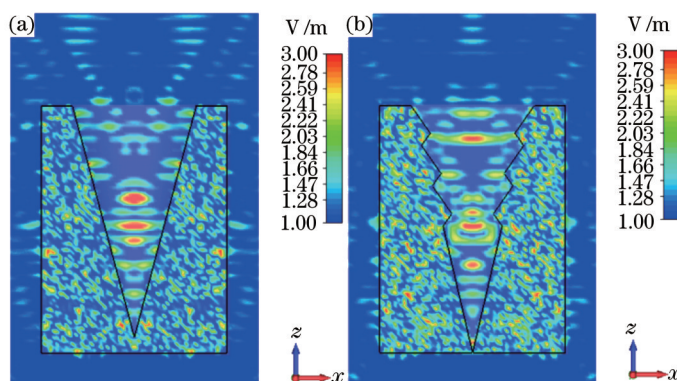


图8 有限差分时域法(FDTD)模拟800 nm波长的入射光在不同微结构单元中的光耦合效应

Fig.8 Optical coupling effects simulated by finite-difference time-domain (FDTD) for the micro-holes with different microstructure under 800 nm wavelength illumination

3.2 圆顶锥形阵列表面微结构

图3(d)所示的“V”型槽结构虽然其间有零星微孔分布,但通过改进激光扫描工艺,可以得到无微孔分布的平行“V”形槽阵列,以此阵列为基础,能够用以制备另一种具有较好减反射特性的表面微结构。实验时,需要大幅度增加光束扫描间距至80 μm,增加单线重复扫描次数至180~200次,在完成XY水平面内某一方向的密排直线扫描后,将样品在XY水平面内旋转90°,以相同工艺进行二次扫描辐照,获得如图9所示的柱状阵列表面结构。

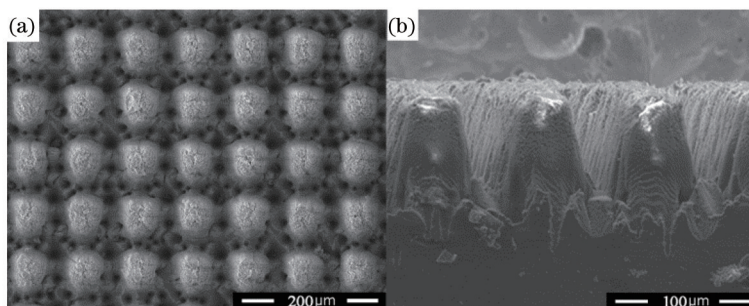


图9 皮秒激光直接扫描获得的柱状阵列SEM图。(a)俯视图;(b)截面图

Fig.9 SEM images of the column array textured by picosecond laser direct scanning. (a) Top view; (b) cross section view

图9显示,柱状单元顶部和侧面覆盖有明显的熔凝物,部分单元顶部出现缺损,该现象说明虽然皮秒激光作用于材料的热影响极小,但当扫描重复次数过高时,仍然会因为激光能量叠加输入引起明显的热积累,造成材料的熔化及熔凝,其间还有辐照升温应力及冲击应力所造成的损伤。对柱状单元顶部熔凝物进行能量色散谱(EDS能谱)测试,发现含有较多氧元素,其组成可以用 SiO_x ($X=1.328$)表示。之后进行HF酸简单漂

洗及热碱溶液浸洗 90 s 的去损伤处理。图 10 为经酸碱去损伤处理后的表面微结构显微形貌图,呈排列整齐的周期性圆顶锥形阵列,阵列高度基本一致,如图 10(b)所示,顶部光滑而没有缺损,原来结构单元顶部和侧面覆盖的熔凝物已被去除,EDS 能谱显示为纯相 Si 元素。单元阵列分布均匀,各单元轴线间距约为 80 μm ,平均高度约为 40 μm 。结构单元连接处分布有细微锥孔,锥孔平均孔径为 10~20 μm ,平均孔深为 20~25 μm ,这种单元连接处分布有细微锥孔的周期性圆顶锥形阵列表面微结构有利于增加入射光在材料表面的有效光程,对提高材料表面的减反射率起到有益作用。经测试,该表面在 400~1000 nm 波长范围内的平均反射率约为 7%,如图 11 所示。

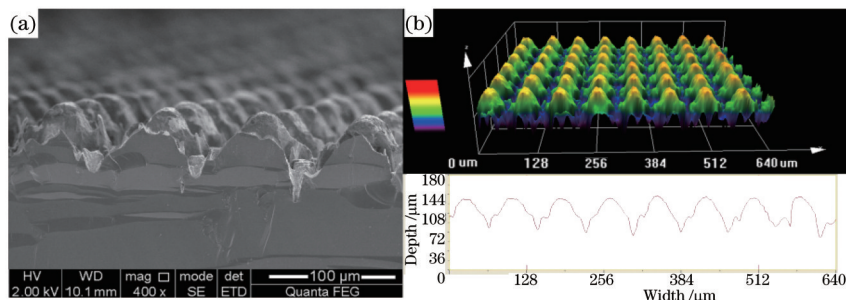


图 10 周期性圆顶锥形阵列表面形貌图。(a) SEM 图; (b) LSCM 图

Fig.10 Surface morphology of the dome-cone array texture. (a) SEM image; (b) LSCM image

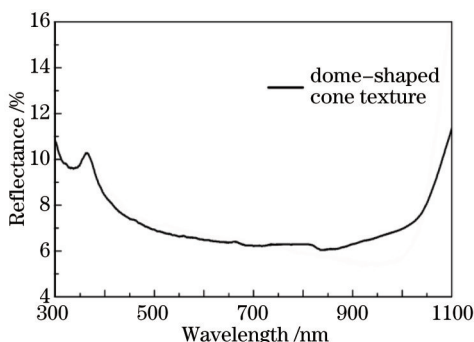


图 11 具有周期性圆顶锥形阵列表面微结构样品的反射率

Fig.11 Surface reflectance of the textured dome-cone array sample

相较于微纳双结构孔阵列表面微结构,周期性圆顶锥形阵列微结构样品的反射率略高,但也达到了小于 10% 的水平。而且,不似传统湿式化学织构法制备结构单元的随机性,该技术所制备结构单元的形貌、尺寸和排列均可按设计要求,通过皮秒激光扫描工艺辅以简单快速的酸碱去损伤处理来实现,有望针对特定波长范围设计特殊的结构单元分布,低成本地实现所需的高效减反射表面微结构的制备。

4 结 论

采用皮秒激光在晶硅表面制备特定的微孔/槽分布,再经快速化学腐蚀(最长腐蚀时间为 3 min)或化学去损伤处理(腐蚀时间约为 90 s)制备了微-纳双结构孔阵列和圆顶锥形周期性阵列两种新型硅基高效减反射表面结构。在 400~1000 nm 的波长范围内,两种结构的平均反射率均低于 10%,其中微-纳双结构孔阵列表面的平均反射率低于 5%,结构中的二级纳米精细结构对光吸收的耦合效应在显著降低晶硅的减反射率中起到了关键性作用。激光扫描所制备的微孔/槽阵列对最终减反射表面微结构单元的形成起到定位作用,同时,微孔/槽阵列的形成质量对最终表面微结构的反射率也有很大影响。该技术的制备环境开放,无需掩膜和昂贵的光刻工序,为基于激光技术的低成本高效减反射晶硅表面微结构的制备提供了新的研发途径。

参 考 文 献

1 Lu Zheng, Chong Geng, Qingfeng Yan. Hierarchically ordered arrays based on solvent vapor annealed colloidal monolayers for antireflective coating[J]. Thin Solid Films, 2013, 544: 403-406.

- 2 B G Prevo, E W Hon, O D Velev. Assembly and characterization of colloid-based antireflective coatings on multicrystalline silicon solar cells[J]. *J Mater Chem*, 2007, 17(8): 791-799.
- 3 C H Sun, P Jiang, B Jiang. Broadband moth-eye antireflection coatings on silicon[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(6): 061112.
- 4 Grauvogl M, Aberle A, Hezel R. 17.1% Efficient truncated-pyramid inversion-layer silicon solar cells[C]. 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1996: 433-436.
- 5 Chen Gang, Ma Xun, Liu Zuming, *et al.*. Research on monocrystalline silicon surface etching[J]. *Manufacturing and Application of Device*, 2010, 35(2): 137-141.
陈 刚, 马 逊, 刘祖明, 等. 单晶Si材料表面碱织构实验研究[J]. *器件制造与应用*, 2010, 35(2): 137-141.
- 6 Nishimoto Y, Namba K. Investigation of texturization for crystalline silicon solar cells with sodium carbonates solutions[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, 61(4): 393-402.
- 7 Zhou Chunlan, Wang Wenjing, Zhao Lei, *et al.*. Preparation and characterization of homogeneity and the pyramids on the textured single silicon crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8): 5777-5783.
周春兰, 王文静, 赵 雷, 等. 单晶硅表面均匀小尺寸金字塔制备及其特性研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(8): 5777-5783.
- 8 Xi Zhenqiang, Yang Deren, Wu Dan, *et al.*. Texturization of monocrystalline silicon for solar cells[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2002, 23(3): 285-289.
席珍强, 杨德仁, 吴 丹, 等. 单晶硅太阳能电池的表面织构化[J]. *太阳能学报*, 2002, 23(3): 285-289.
- 9 Long Xuewen, Bai Jing, Liu Xin, *et al.*. Inscription of waveguides in terbium gallium garnet using femtosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0432002.
龙学文, 白 晶, 刘 欣, 等. 飞秒激光在铽镱石榴石中的光刻光波导[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0432002.
- 10 Chen Chao, Yang Xianhui, Wang Chuang, *et al.*. High-order tilted fiber Bragg gratings carved with femtosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0506001.
陈 超, 杨先辉, 王 闯, 等. 飞秒激光刻写高阶倾斜光纤 Bragg 光栅[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0506001.
- 11 Shen Bin, Li Haiyuan, Xiong Huai, *et al.*. Study on the colloidal regularity of porous SiO₂ antireflective of porous SiO₂ antireflective coatings[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0906002.
沈 斌, 李海元, 熊 怀, 等. 多孔性二氧化硅减反膜胶体规律性研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0906002.
- 12 Zhang Zhuqing, Wang Qiang, Hua Guoran, *et al.*. Influence of YAG laser frequency on a:H-Si thin films micro-crystallization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 021406.
张竹青, 王 强, 花国然, 等. YAG激光频率对 a:H-Si 薄膜微晶化的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 021406.
- 13 Zhang Chao, Zhang Qingmao, Guo Liang, *et al.*. Texturing process with 355 nm laser for amorphous silicon film solar cell[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0707004.
张 超, 张庆茂, 郭 亮, 等. 非晶硅薄膜太阳能电池的紫外激光制绒工艺[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0707004.
- 14 Zhang Shan, Hu Xiaoning, Liao Yang, *et al.*. Microstructuring of anti-reflection film for HgCdTe/Si IRFPA with femtosecond laser pulse[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(3): 033101.
- 15 Dobrzański L A, Drygala A. Laser processing of multicrystalline silicon for texturization of solar cells[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 191(1-3): 228-231.
- 16 Kwang Ryul Kim, Tae Hoon Kim, Hyun Ae Park, *et al.*. UV laser direct texturing for high efficiency multicrystalline silicon solar cell [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 264: 404-409.
- 17 K Kumar, K C Lee, J Nogami, *et al.*. Ultrafast laser direct hard-mask writing for high performance inverted-pyramidal texturing of silicon[C]. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012: 002182-002185.
- 18 Wang Xuemeng, Zhao Ruqiang, Shen Hui, *et al.*. Laser surface texturation of multicrystalline silicon for solar cell[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(1): 011401.
王学孟, 赵汝强, 沈 辉, 等. 用于太阳能电池的多晶硅激光表面织构化研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(1): 011401.
- 19 Tsing-Hua Her, Richard J Finlay, Claudia, *et al.*. Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(12): 1673-1675.
- 20 Li Ping, Wang Yu, Feng Guojin, *et al.*. Study of silicon micro-structuring using ultra-short laser pulses[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(12): 1688-1691.
李 平, 王 煜, 冯国进, 等. 超短激光脉冲对硅表面微构造的研究[J]. *中国激光*, 2006, 33(12): 1688-1691.
- 21 Shen Zenan, Liu Bangwu, Xia Yang, *et al.*. Advances in fabrication and application of black silicon[J]. *Research & Progress of SSE*,

- 2011, 31(4): 387-392.
- 沈泽南, 刘邦武, 夏 洋, 等. 黑硅制备及应用进展[J]. 固体电子学研究进展, 2011, 31(4): 387-392.
- 22 Ji Lingfei, Ling Chen, Li Qiurui, *et al.*. Research progress and development of industrial application of picosecond laser processing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 115-126.
- 季凌飞, 凌 晨, 李秋瑞, 等. 皮秒激光工程应用研究现状与发展分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 115-126.
- 23 Wang Guobiao. Photonic manufacturing science & technology: overview and outlook[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(21): 157-169.
- 王国彪. 光制造科学与技术的现状和展望[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21): 157-169.
- 24 Sha Tao, Benxin Wu, Yun Zhou, *et al.*. Thermal modeling and experimental study of infrared nanosecond laser ablation of silicon[J]. J Appl Phy, 2009, 106(12): 123507.

栏目编辑: 刘丰瑞