

硅基中长波红外减反微结构研究

吴启花^{1,2}, 熊敏¹, 黄勇¹, 张宝顺¹, 白煜²

- (1. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123;
2. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:采用微加工工艺在 Si 衬底上制备了微柱和微锥阵列, 结合光学建模分析, 研究了结构参数对中长波(2.5~9 μm)红外光反射率的影响规律。使用严格耦合波分析方法(RCWA)计算的微结构反射光衍射效率与傅里叶红外变换光谱仪(FTIR)测试的反射率结果吻合较好。研究表明, Si 基微结构对 TM 及 TE 偏振光均有良好的红外光减反特性, 微锥结构具有更好的减反效果, 2.5~6.5 μm 中红外偏振光的反射率低至 2%, 同时表现出良好的宽谱与广角度减反特性。

关键词: Si 基微结构; RCWA; 中长波红外; 偏振

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0404001

Antireflective silicon based microstructures for the mid- and long-wavelength infrared

Wu Qihua^{1,2}, Xiong Min¹, Huang Yong¹, Zhang Baoshun¹, Bai Yu²

- (1. Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;
2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Si based micro-pillar arrays and micro-cone arrays were fabricated using micro processing technology, the reflection performance of the micro structures was studied in the long wave infrared wavelengths (2.5–9 μm) reflection performance of different polarized light. Micro-fabrication combined with modeling analysis of silicon based micro-pillar and micro-cone arrays have been performed to study the effects of structural parameters on the reflectivity of infrared light from 2.5–9 μm . Simulation results using rigorous coupled wave analysis (RCWA) method is in line with the test results from a Fourier transform infrared spectrometer (FTIR). It is found that the antireflection characteristics can be obtained for both transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarizations, and the micro-cone arrays have lower reflectivity than the micro-pillar arrays. Moreover, the optimized micro-cone arrays show a reflectivity of only 2% or lower from 2.5–6.5 μm under TM polarization, with wide-spectrum and omnidirectional antireflection characteristics.

Key words: Si based microstructures; RCWA; mid-and long-wavelength infrared; polarizations

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 中科院百人计划(Y6BEQ11001)

作者简介: 吴启花(1987-), 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事红外探测器方面的研究。Email: qhwu2014@sinanno.ac.cn

通讯作者: 熊敏(1981-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事红外探测器材料与器件方面的研究。Email: mxiong2010@sinanno.ac.cn

0 引言

工作于中波(3~5 μm)与长波(8~12 μm)红外两个大气窗口的红外探测器在军事与民用领域有着非常广泛与重要的应用,探测器器件通常采用 IV 族单质、III-V 族化合物半导体块体材料及低维结构来制备。由于半导体材料具有较高的折射率(如 Si=3.42, Ge=4.2, III-V 族半导体材料大约在 3.5~6 之间),红外光入射时会在空气与材料界面发生反射。例如,根据菲涅尔方程,当红外光正入射时, Si 和 Ge 的反射率分别为 47% 和 60%。为降低材料表面的反射,常规的方法是采用多层光学薄膜用于折射率调节。减反膜的折射率需满足 $n_1=(n_i n_s)^{1/2}$, 其中 n_i 和 n_s 分别为空气和材料的折射率;且减反膜的厚度满足 $h=\lambda/(4n_1)$ 。通过在界面处沉积多层电介质薄膜制备的传统减反膜,尽管在特定波长范围内具有较低的反射率(<1%),但带宽较窄、制作成本较高,还存在减反特性随角度依赖性大以及多层薄膜之间的热应力难以消除等缺点,在实际应用时存在诸多局限^[1-4]。随着仿生技术的进步,人们受飞蛾“蛾眼”结构的启发引入微米与纳米级的微结构阵列用于光学减反,通过对微结构高度、周期及深宽比等参数的调节便可以获得需要的有效折射率,从而降低所需波长范围内反射率。由于微结构的制作未引入新的材料,避免了热应力匹配等问题。近年来,针对可见光与近红外波段(0.3~1.0 μm)减反的微结构得到了深入的研究,主要用于提升太阳能电池的光电转化效率^[5-10]。对这类微纳结构的研究表明,柱状与锥状结构在宽光谱以及大范围角度入射等方面具有良好的效果^[11]。Ping-Chun Li 等人^[12]采用胶体掩膜光刻及刻蚀的方法,在低折射率材料上制备亚波长纳米结构,并研究了其在较大范围入射角入射和不同偏振光下的光学透射情况,研究发现该结构在可见光波段、0°~70°范围入射时,透射率>90%。FL Gonzalez 等人^[13]报道了垂直纳米线阵列红外波段的减反效果,直径 320 nm 的纳米线深宽比为 9.4 时在 7.5~23 μm 红外波段的透射率可达 90% 以上,且增加深宽比在长波方向的减反效果更佳。Kanamori 等^[14]利用多孔氧化铝模板和快速原子束刻蚀在硅基表面制备 100 nm 周期的锥形结构,在可见光波

段的反射率降低到 1.6%。

文中研究并设计了在中波与长波红外波段具有光学减反效果的微结构阵列,通过微加工工艺制备了 Si 基的减反微结构,计算并测试了宽光谱范围内不同偏振光在微结构表面的反射率,研究了微结构的减反机制以及光反射特性的微结构参数调节方法。

1 理论及计算方法

为了获得广角度及宽光谱范围的减反效果,微结构的几何形貌需要具备最佳的有效折射率分布梯度。根据等效介质理论可计算出 TM(电场矢量平行于入射平面)和 TE(电场矢量垂直于入射平面)偏振状态下的有效折射率。当微结构周期与入射波长的比值接近 0 时(即 $P/\lambda \rightarrow 0$),按照零级等效介质理论计算的等效折射率为:

$$n_{\text{eff,TE}}^{(0)} = \sqrt{(1-f)n_1^2 + fn_2^2}$$

$$n_{\text{eff,TM}}^{(0)} = \frac{n_1 n_2}{\sqrt{(1-f)n_1^2 + fn_2^2}}$$

式中: $N_{\text{eff,TE}}^{(0)}$ 为 TE 偏振时的等效折射率; $N_{\text{eff,TM}}^{(0)}$ 为 TM 偏振时的等效折射率; f 为填充因子,为微柱直径与周期的比值,计算公式如下:

$$f = D/P$$

当微结构周期与入射波长的比值不接近 0 时,则按照二级等效衍射理论计算:

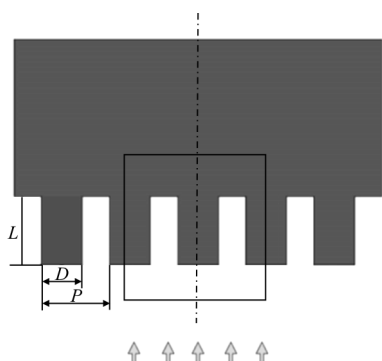
$$n_{\text{eff,TE}}^{(2)} = \sqrt{\left(n_{\text{eff,TE}}^{(0)}\right)^2 + \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{P}{\lambda}\right)^2 f^2 (1-f)(n_2^2 - n_1^2)^2}$$

$$n_{\text{eff,TM}}^{(2)} =$$

$$\sqrt{\left(n_{\text{eff,TM}}^{(0)}\right)^2 + \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{P}{\lambda}\right)^2 f^2 (1-f) \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right)^2 \left(n_{\text{eff,TM}}^{(0)}\right)^6 \left(n_{\text{eff,TE}}^{(0)}\right)^2}$$

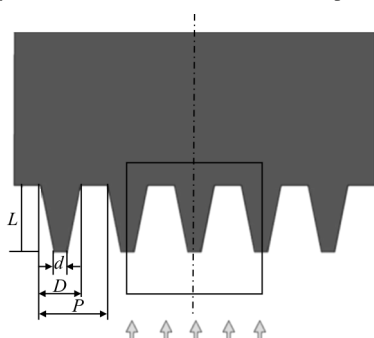
文中减反微结构的衍射效率采用严格耦合波分析方法(RCWA)求解。RCWA 属于矢量衍射理论,引入傅里叶变换来严格求解微结构区域内的 Maxwell 方程,通过特征函数问题的求解得到微结构区域由特征函数表象的电磁场,通过微结构区域边界条件的求解得到最终的衍射效率数值^[15]。RCWA 方法求解的精度精受傅里叶展开级数的限制,计算误差来自计算中将无穷维方程截断为有限维方程。

实验中建立了 Si 基微结构的二维物理模型,如图 1 所示,图 1(a)为 Si 柱周期性阵列的模型,图 1(b)为 Si 锥周期性阵列的模型。微结构的主要结构参数为周期 P 、高度 L 及底端直径 D 和顶端直径 d 。由于微结构为周期性结构,模拟时选用的计算区域如图中实线所示的正方格区域, X 和 Y 方向的最小值和最大值分别为 $-P$ 和 $+P$, Z 方向的最小值和最大值应包含圆柱/锥的高度以及圆柱/锥与基底的界面,因而计算时 Z 值的最大及最小值分别在硅柱高度 L 的基础上加上 2。 X 和 Y 方向的网格大小和薄片切割大小为 0.005, Z 方向为 0.01。计算时采用的空间谐波级数越多,则展开的周期函数越接近实际的介电常数分布,计算结果越准确,同时也越耗时,综合考虑并检验数据收敛后采用的空间谐波数为 31 个。



(a) Si 基微柱型结构物理模型

(a) Physical model of silicon based micro-pillar arrays



(b) Si 基微锥型结构物理模型

(b) Physical model of silicon based micro-cone arrays

图 1 Si 基减反微结构的二维物理模型

Fig.1 Two-dimensional physical model of silicon based antireflective micro-structure

计算中重点考察了反射光的衍射效率,某级衍射光的衍射效率为该衍射光的能量与入射光能量之

比。当介质材料对入射光无吸收时,各反射、透射级次的衍射效率之和为 1,否则反射、透射光的总衍射效率小于 1。

2 实验

2.1 硅柱及硅锥阵列的制备及形貌表征

为了验证设计与光学仿真的计算结果,采用标准的微加工工艺在 Si 片上制作了大面积均匀的柱状与锥状阵列。实验中采用了 N 型 2 in (1 in=2.54 cm) 400 μm 厚的 Si 片作为衬底,制备流程如图 2 所示:首先将硅片使用 RCA 标准清洗程序进行清洗,待硅片烘干后,旋涂一层光刻胶,通过 Nikon i7 步进式投影光刻机 (Stepper) 将设计的微结构图形转移至硅片上,利用光刻胶做掩膜,使用 STS HRM 深硅刻蚀工艺 (ICP deep silicon etching),将硅表面刻蚀出 5 μm 深的 Si 柱,并用丙酮、异丙醇清洗去除光刻胶,制备出所需要的 Si 柱阵列;最后,基于已制备的 Si 柱阵列样品,通过 Tegal 903e 反应离子刻蚀设备 (RIE) 的低速刻蚀工艺制作锥形阵列样品。工艺结束后,采用 JSM 扫描电子显微镜 (SEM) 对实验制备的 Si 基微柱与微锥阵列进行形貌表征,如图 3 所示,微结构排列规整并且刻蚀表面光滑。

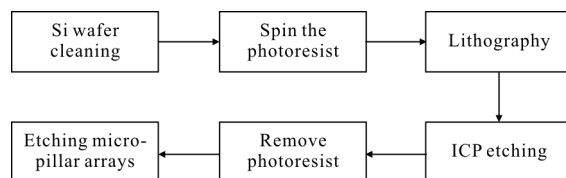
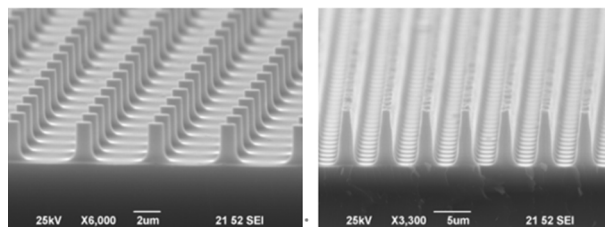


图 2 硅基微柱/锥结构制备流程

Fig.2 Preparation process of silicon based micro-pillar/cone arrays



(a) Si 基微柱阵列的 SEM 图

(b) Si 基微锥阵列的 SEM 图

(a) SEM image of silicon based micro-pillar array

(b) SEM image of silicon based micro-cone array

图 3 Si 基微结构 SEM 形貌图

Fig.3 SEM images of silicon based micro-structures

2.2 光学反射率测试

实验中的 Si 材料为 400 μm 厚的普通高掺杂 N 型 Si 片,透射率测试时 Si 片内自由载流子对红外光的吸收会干扰测试结果,因此文中的光谱分析以反射率测试为主。

论文的红外光学反射率的测试采用 Nicolet 傅里叶红外变换光谱仪 (FTIR) 及其反射率测试附件 VeeMax。VeeMax 附件在反射率的测试中,其入射光的角度可在 0°~80°之间连续变化,偏振光的极化角可在 0°~90°之间连续变化,通过变换不同的偏振光角度,可测试不同偏振光下的微结构在中长波红外(λ=2.5~9 μm)波段的反射率情况。样品测试温度为室温 300 K 左右,分辨率 4 cm⁻¹,扫描次数 128,反射率测量时采用 Au 膜做标样,入射角 50°,分别测试 TM 偏振和 TE 偏振光下的微结构反射率。

3 结果与讨论

文中针对在中波红外与长波红外波段反射率减反的需求设计了具有不同尺寸参数的 Si 基微柱与微锥阵列结构,并将部分结构通过实验制备成样品,主要的结构及样品参数的变化如表 1 所示。

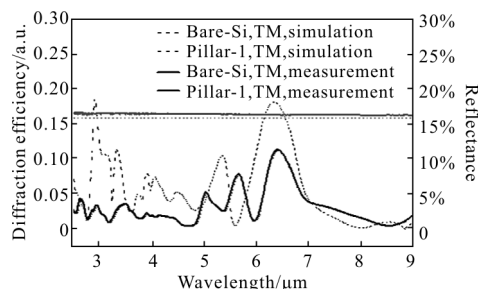
表 1 实验样品结构参数

Tab.1 Structural parameters of the sample

No.	Period/ μm	Length/ μm	Bottom diameter/μm	Top diameter/μm
Sample pillar-1	5.0	5.0	2.0	2.0
Sample pillar-2	5.0	5.0	3.0	3.0
Sample cone-1	5.0	5.0	3.0	1.0
Structure cone-2	5.0	5.0	3.0	0.5
Structure cone-3	5.0	5.0	3.0	1.5
Structure cone-4	5.0	5.0	3.0	2.0

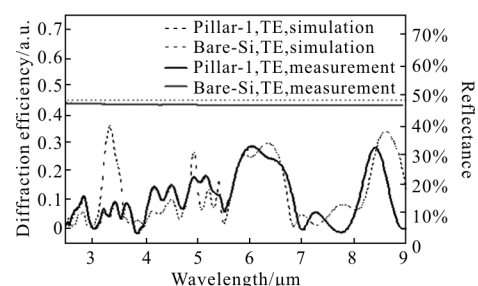
为了验证计算方法的可靠性,图 4 首先比较了裸硅片与微柱阵列结构在偏振光的实测反射率与计算衍射效率随波长的变化情况。图 4(a)所示为 TM 偏振光的情况,图 4(b)所示为 TE 偏振光的情况。从图中可以看出,无论是 TM 偏振还是 TE 偏振光,在 λ=2.5~9 μm 波长范围,样品 pillar-1 的反射率均比裸硅片的反射率低,且从图中可以看出模拟计算的裸硅片和样品 pillar-1 的反射光衍射效率几乎与测

试的反射率曲线波形一致,证明当前的模型与计算方法可靠。



(a) TM 偏振,入射角 θ=50°,λ=2.5~9 μm 时衍射效率和反射率情况

(a) Diffraction efficiency and reflectance with TM polarizations, θ=50°, λ=2.5~9 μm



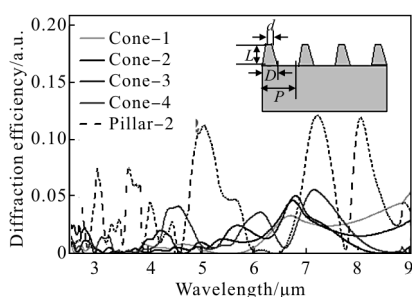
(b) TE 偏振,入射角 θ=50°,λ=2.5~9 μm 时衍射效率和反射率情况

(b) Diffraction efficiency and reflectance with TE polarizations, θ=50°, λ=2.5~9 μm

图 4 裸 Si 和样品 pillar-1 在 λ=2.5~9 μm 时的衍射效率和反射率
Fig.4 Diffraction efficiency and reflectance of bare-Si and sample pillar-1 with λ=2.5~9 μm

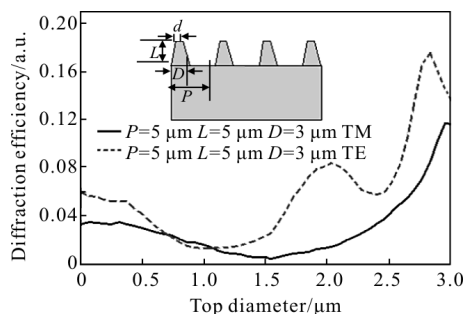
Si 基微结构对红外光的减反效果主要源于红外光入射后在微结构中传播的 HE₁₁ 波导模式,该模式的分布与传导随入射的红外光波长变化。忽略硅片中杂质对红外光的微弱吸收,当特定波长的红外光入射到 Si 柱表面时,红外光在微柱顶部的硅/空气界面发生光学作用,并在微柱底部的硅/空气界面处发生反射或透射。由于柱和衬底都是同种匀质材料,折射率相同,因而导致柱模式与衬底的光耦合增加,从而大大地减小反射率并增加透射率。且 Si 柱的这种微结构使得入射光在界面处的折射率由突变转化为渐变,如果折射率在界面处的变化足够平缓,光在界面处的反射就会大幅降低。为了获得良好的减反效果,理论上需要设计并制备具有最佳折射率分布梯度的微结构。

图 5 模拟了固定周期 P 、深度 L 和底端直径 D 的情况下,不同顶端直径 d 的 Si 基微锥结构在 TM 偏振光入射时反射光衍射效率随波长的变化曲线。其中 Si 锥微结构周期 $P=5\ \mu\text{m}$, $L=5\ \mu\text{m}$, $D=3\ \mu\text{m}$, 顶端直径从 $0.5\ \mu\text{m}$ 增加至 $3.0\ \mu\text{m}$, 步长 $0.5\ \mu\text{m}$ 。如图 5(a)所示,相同周期和高度的锥阵列在 $2.5\sim 9\ \mu\text{m}$ 波长范围的反射光衍射效率均比柱阵列更低。特别的,顶端直径 d 为 $1.0\ \mu\text{m}$ 的结构 cone-1, 锥阵列的反射光衍射效率均在 0.03 以内, 且衍射效率曲线更平缓, 振荡更小, 在 $2.5\sim 6.5\ \mu\text{m}$ 波长范围具有显著的宽



(a) $\lambda=2.5\sim 9\ \mu\text{m}$, 入射角 $\theta=50^\circ$, TM 偏振, 不同顶端直径 d 的硅柱/锥阵列的反射光衍射效率情况

(a) Reflected light diffraction efficiency of micro-pillar/cone arrays with different top diameter d under TM polarizations as $\lambda=2.5\sim 9\ \mu\text{m}$, $\theta=50^\circ$



(b) 入射角 $\theta=50^\circ$, 波长 $\lambda=8\ \mu\text{m}$, TM 及 TE 偏振时, 周期 $P=5\ \mu\text{m}$, 底部直径 $D=3\ \mu\text{m}$ 时, 顶端直径 d 微锥连续变化时与反射光衍射效率的关系曲线

(b) Simulated reflected light diffraction efficiency of micro-cone arrays with $P=5\ \mu\text{m}$ and $D=3\ \mu\text{m}$ at $\lambda=8\ \mu\text{m}$, $\theta=50^\circ$, as a function of continuous changing top diameter d under both TM and TE polarizations

图 5 顶端直径 d 的变化对 Si 基微锥结构在 TM 及 TE 偏振光入射时反射光衍射效率的影响

Fig.5 Impact of different top diameter d on the reflected light diffraction efficiency of micro-cone arrays under both TM and TE polarizations

谱减反特征。这是因为 Si 锥结构比 Si 柱结构在界面处的折射率渐变更加平缓, 入射光难以响应这种微小变化从而降低了反射率。图 5(b)模拟了当波长 $\lambda=8\ \mu\text{m}$, TM 及 TE 偏振时, 反射光的衍射效率随顶端直径 d 连续变化时的线性关系。图中能看出随着顶端直径 d 的减小, 衍射效率开始迅速下降, 对 TM 光与 TE 光 d 值分别在 $1\ \mu\text{m}$ 与 $1.5\ \mu\text{m}$ 有最佳的减反效果。

当红外光入射角度发生变化时, 微结构附近区域的光功率分布相应变化, 图 6 对比分析了微锥与微柱结构在波长 $8\ \mu\text{m}$ 偏振光变角度入射 ($\theta=0^\circ\sim 80^\circ$) 时反射光衍射效率随入射角的变化情况。计算表明, 除了 TE 偏振光在 $\theta=0^\circ\sim 10^\circ$ 范围内入射之外, TM 与 TE 偏振光入射时微锥样品 cone-1 的反射光衍射效率均比微柱样品 pillar-2 要低得多。实线所示的样品 pillar-2 随入射角变化时的衍射效率曲线波动大, 对入射角变化比较敏感, 而虚线所示的样品 cone-1 曲线在整个角度范围内的衍射效率曲线更为平缓, 对入射角度不敏感, 表现出显著的广角度范围内减反的特征。

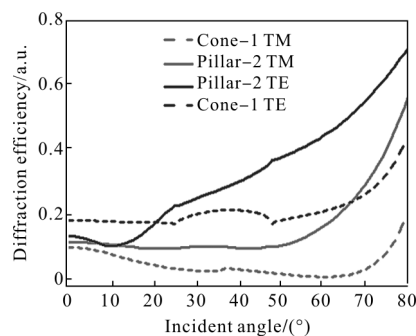


图 6 相同结构尺寸的硅柱和硅锥阵列随入射角度变化的反射光衍射效率情况

Fig.6 Reflected light diffraction efficiency of micro-pillar and micro-cone arrays as functions of angle of incidence with the same dimension parameters

考虑到微加工过程相比设计值可能引入的尺寸偏差, 进一步对比分析了 Si 基微柱与微锥结构实测的反射率与计算的反射光衍射效率值。微柱样品 pillar-2 与微锥样品 cone-1 具有相同周期、高度及底端直径。图 7 为两个样品在不同偏振光情况下, 50° 入射时的反射率测试结果与计算结果。从图 7(a) 中可看出 TM 光入射时, 样品 cone-1 在 $7\sim 9\ \mu\text{m}$ 波长范围实测与计算值有所偏差, 在其他波长范围内两个样品的实测与计算波形、数值基本一致。在 2.5

~6.5 μm 波长范围内,微锥样品的反射率低于微柱样品,数值在 2%以内,且反射率曲线平滑波形振荡小。当入射光为 TE 偏振时,实测与计算结果如图 7(b)中所示,微柱样品的测试与计算结果一致性较高,而微锥样品在 5.5~9 μm 波长范围存在偏差。对于微锥样品实测与计算结果偏差的现象,主要原因在于微锥结构在工艺制备时结构尺寸,例如高度与直径会在一定程度上偏离设计值,并且微结构的侧壁形貌也与理想的几何结构有所不同,结构的偏差引起了减反性能的差异。由于微柱结构的结构简单,微加工过程的偏差较小,因此实测与计算结果的一致性较高,实际减反效果更接近与设计的预期效果。

善了折射率渐变效果,微锥结构具有更好的减反效果,TM 偏振时可获得 2.5~6.5 μm 中红外波长范围内低至 2%的反射率。同时通过计算分析,微锥结构具有更好的宽谱与广角度减反效果。另一方面,微柱由于结构简单、工艺偏差小,实际减反效果与设计值的一致性优于微锥结构。由于在中长波红外波段,Si 与 III-V 族半导体材料的折射率相近,因而对于 Si 基微柱及微锥结构的红外减反性能的研究方法和结果有望推广到 III-V 族半导体材料中。

参考文献:

[1] Raut H, Ganesh V, Nair A, et al. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review [J]. *Energy Environ*, 2011, 4 (10): 3779-3804.

[2] Chattopadhyay S, Huang Y F, Jen Y J, et al. Anti-reflective and photonic nanostructures [J]. *Mater*, 2010, 69 (1-3): 1-35.

[3] Fu Xiuhua, Yang Jinye, Liu Dongmei, et al. Design and preparation of anti-reflection and protective film in 8-11 μm infrared detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3889-3893. (in Chinese)
付秀华, 杨金也, 刘冬梅, 等. 基于 8~11 μm 红外窗口系统中减反射与保护膜的研制 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 3889-3893.

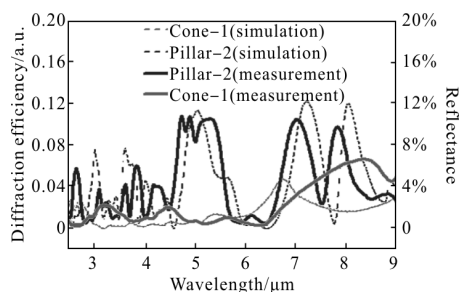
[4] Qi Yu, Sun Ping, Feng Jimeng, et al. Anti-reflection coating of higher efficiency on Si solaode [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1987, 10(3): 67-72. (in Chinese)
齐钰, 孙平, 冯纪蒙, 等. 用于硅太阳能电池的高效减反射膜[J]. *光学精密工程*, 1987, 10(3): 67-72.

[5] Peng K Q, Wang X, Lee S T. Silicon nanowire array photoelectron chemical solar cells [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(16): 1-3.

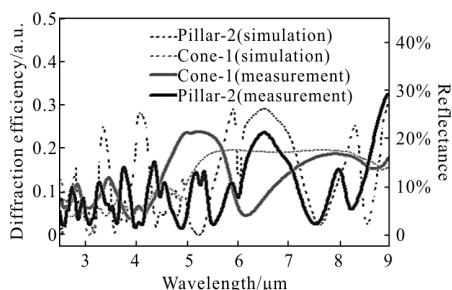
[6] Zhu J, Yu Z F, G F Burkhard, et al. Optical absorption enhancement in amorphous silicon nanowire and nanocone arrays[J]. *Nano Lett*, 2008, 9(1): 279-282.

[7] Hsu C M, Battaglia C, Pahud C, et al. High efficiency amorphous silicon solar cell on a periodic nanocone back reflector[J]. *Advanced Energy Materials*, 2012, 2(6): 628-633.

[8] Liao Tongqing, Peng Lulu, Xiao Guangdong, et al. Reduce reflected light from silicon solar cells based on optical microstructure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (1): 201-204. (in Chinese)
廖同庆, 彭露露, 肖广东, 等. 基于周期性二维光学微结构减小硅太阳能电池光的反射 [J]. *红外与激光工程*, 2015,



(a) TM 偏振光入射
(a) TM polarization



(b) TE 偏振光入射
(b) TE polarization

图 7 Si 基微柱与微锥结构在 TM 及 TE 偏振光下反射率随入射波长变化的实测与计算结果对比

Fig.7 Measured (solid lines) and simulated (dashed lines) reflectance of silicon based micro-pillar and micro-cone arrays as functions of incident wavelength under both TM polarization and TE polarization

4 结论

文中设计并制备了在 2.5~9 μm 的中长波红外波长范围内对偏振光有良好减反效果的 Si 基微柱与微锥阵列。微柱结构顶端收缩成为微锥结构后改

- 44(1): 201–204.
- [9] Liao Tongqing, Wei Xiaolong, Wu Sheng, et al. Reduction of reflected light from silicon solar cells through spherical optical micro/nano-structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0116001. (in Chinese)
廖同庆, 魏小龙, 吴昇, 等. 利用球形微纳米颗粒结构表面减小硅基太阳能电池的光反射 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0116001.
- [10] Dong Tingting, Fu Yuegang, Chen Chi, et al. Design and manufacture of columned antireflective periodic microstructures on the surface of Si substrate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0622002. (in Chinese)
董亭亭, 付跃刚, 陈驰, 等. Si 衬底表面圆柱形抗反射周期微结构的设计及制作 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0622002.
- [11] Wang Z Y, Zhang R J, Wang S Y, et al. Broadband optical absorption by tunable Mie resonances in silicon nanocone arrays[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7810–7815.
- [12] Li P C, Edward T Y. Large-area omnidirectional antireflection coating on low-index materials [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(10): 2584–2588.
- [13] Gonzalez F L, Gordon M J. Bio-inspired, sub-wavelength surface structures for ultra-broadband, omni-directional antireflection in the mid and far IR [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 12808–12816.
- [14] Kanamori Y, Hane K, Sai H, et al. 100 nm period silicon antireflection structures fabricated using a porous alumina membrane mask[J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(2): 142–143.
- [15] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1995, 12(5): 1068–1076.