

文章编号: 2095-4980(2021)01-0007-05

## 微纳复合结构增强硅基太赫兹调制器性能

申朝阳, 王元圣, 何雨莲, 杨青慧, 陈智, 文岐业\*

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 611731)

**摘要:** 研究了由微米金字塔阵列和纳米级氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )薄膜构成的微纳复合结构对硅基光控太赫兹调制器调制性能的增强效应和机制。实验表明, 相对于半导体硅片, 硅表面的微米金字塔阵列能够显著减少激光反射率, 提高对激光的利用率, 且能增加太赫兹波的调控面积。更重要的是, 金字塔阵列上沉积的纳米级厚度  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜还能进一步降低激光反射率, 并能明显提升太赫兹波的调制效果, 在  $95.5 \text{ mW/mm}^2$  的激光功率密度下, 其调制深度可达 91.2%。该光控太赫兹调制器在低激光功率下拥有高调制深度, 在太赫兹成像和通信领域都有巨大的应用潜力。

**关键词:** 太赫兹波; 微纳结构; 光控; 调制器

中图分类号: TN761.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020093

## Performance of micro-nano composite structure enhanced silicon-based terahertz modulator

SHEN Chaoyang, WANG Yuansheng, HE Yulian, YANG Qinghui, CHEN Zhi, WEN Qiye\*

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** The enhancement effect and mechanism of the micro-nano composite structure composed of micro-pyramid array and nano-scale alumina( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) film on the modulation performance of silicon-based optically controlled terahertz modulators is studied. Experiments show that the micro pyramid array on the silicon surface can significantly reduce laser reflectivity compared with semiconductor silicon wafers, improve laser utilization, and increase the area of terahertz control. More importantly, the nano-thickness  $\text{Al}_2\text{O}_3$  film deposited on the pyramid array can further reduce the laser reflectivity and significantly improve the modulation effect of the terahertz wave. Under the laser power density of  $95.5 \text{ mW/mm}^2$ , its modulation depth can reach up to 91.2%. The optically controlled terahertz modulator has high modulation depth at low laser power, and shows a huge application potential in the field of terahertz imaging and communication.

**Keywords:** terahertz wave; micro-nano structure; optically controlled; modulator

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波, 波长在 3 mm~30  $\mu\text{m}$  之间<sup>[1]</sup>。太赫兹波具有低能量性、好的相干性、宽带性等优良特性, 在无线通信<sup>[1]</sup>、安检<sup>[2]</sup>、无损探测<sup>[3]</sup>、医学成像<sup>[4]</sup>等方面有着广阔的应用前景。在这些应用中, 太赫兹调控技术起着至关重要的作用。在现有的太赫兹调制器件中, 硅基太赫兹调制器由于其制造技术与现有的 CMOS 工艺兼容, 便于制造、集成, 是当前太赫兹调控技术研究的热点。

2013 年, 首都师范大学的张岩教授利用激光泵浦作用本征硅材料, 实现了全光控太赫兹波空间调制器。这种空间型调制器可以实现太赫兹波前幅度和相位信息的调制, 可用于对太赫兹波束的偏转、聚焦、分束等<sup>[5]</sup>。光泵浦半导体硅构成的硅基太赫兹空间调制器虽具有宽带特性, 但其调制深度较低, 一般在 50%以内, 且硅片对泵浦激光的反射率较大, 对波长在 400~1 000 nm 范围内的激光反射率高达 40%~60%<sup>[6]</sup>。较低的激光利用率不但降

收稿日期: 2020-03-10; 修回日期: 2020-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61831012; 51572042); 科学挑战计划资助项目(TZ2018003)

作者简介: 申朝阳(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹光控调制器、太赫兹相关功能器件。email:chaoyang\_shen@126.com

\*通信作者: 文岐业 email:qywen@uestc.edu.cn

低了器件的调制深度,反射的激光也会对应用系统带来干扰和噪声。此外,研究表明,在硅片上覆盖特定的薄膜材料,其构成的复合结构可以显著提高太赫兹波的调制深度。这些材料包括石墨烯<sup>[7]</sup>、MoS<sub>2</sub><sup>[8]</sup>、CuPc<sup>[9]</sup>、PVA<sup>[10]</sup>等,但这些复合结构均不能有效降低对泵浦激光的反射。在前期的研究中,通过在硅表面制备硅纳米线阵列,发现这一纳米结构能够显著将泵浦激光反射率降低至 18%以下,同时也能将太赫兹波调制深度提升至 75%左右<sup>[6]</sup>。最近,通过在硅表面制备微米级的金字塔阵列,发现这一微米结构也能显著降低激光反射率至 25%,并提高太赫兹调制深度达到 90%<sup>[11]</sup>。因此,通过微米结构与纳米结构的复合,有可能同时提高激光的利用率和显著增加器件的调制深度,但目前通过微纳复合结构增强太赫兹调制效果的研究非常少。

本文提出一种微纳复合结构硅基光控太赫兹调制器。先通过化学刻蚀的方法在高阻硅表面刻蚀,形成具有金字塔结构的黑硅<sup>[12]</sup>,再通过原子层沉积的方法在黑硅表面镀上一层 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜。这种金字塔结构的黑硅表面一方面可以减少对泵浦激光的反射,另一方面可以增加对太赫兹波的调控面积。黑硅表面的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜则可以进一步减少黑硅对泵浦激光的反射<sup>[13]</sup>。因此,可以在降低激光反射的情况下极大提高太赫兹波的调制深度。实验表明,微纳复合结构硅基光控太赫兹调制器在波长为 808 nm 的半导体连续波激光器的泵浦作用下,在泵浦激光 1.2 W 时(功率密度为 95.5 mW/mm<sup>2</sup>),其调制深度可达到 91.2%。

## 1 实验

实验选取尺寸 15 mm×15 mm,双面抛光(100 晶向),电阻率>1 000 Ω·cm,厚度约 500 μm 的低掺杂 N 型硅片。硅片经过严格清洗后,再取氢氧化钾(KOH)固体 3 g、异丙醇(IPA)15 mL、去离子水 50 mL 配置形成刻蚀液,用于刻蚀硅片。刻蚀硅片时,在水浴加热的条件下控制刻蚀温度为 85 ℃,刻蚀时间 15 min。刻蚀过程中不停地搅拌,以防止刻蚀过程中产生的气泡阻止刻蚀,将刻蚀形成的具有微米级金字塔阵列的硅片称为“黑硅”。黑硅制备完成后,再利用原子层沉积(Picosun SUNALETM R200)在黑硅表面镀上一层 100 nm 厚的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,将其简称为“微纳米结构硅”。相同条件下清洗的硅片和制备的黑硅作为对比。

利用高分辨力的场发射扫描电子显微镜(JEOL JSM-7600F)对微纳米结构硅的表面形貌进行表征。利用紫外—可见光—近红外分光光度计(PerkinElmer Lambda 750)测试调制器的紫外—可见光—近红外反射光谱以表征光学性能。利用太赫兹时域光谱(THz time Domain Spectroscopy, TDS)系统(Fico, Zomega Terahertz Co. Ltd.)测试调制器的时域谱,频域的透射谱则根据快速傅里叶变换对时域谱进行处理得到。波长 808 nm 的连续波半导体激光器被用于产生泵浦激光,激光最大功率为 1.2 W。为使激光光束能完全覆盖 TDS 系统所产生的 THz 波束(直径约 2~3 mm),将激光的光斑直径控制在 4 mm,这样最大的激光功率密度为 95.5 mW/mm<sup>2</sup>。

## 2 结果与讨论

图 1 为微纳米结构硅表面形貌的扫描电子显微镜图,可以看到,表面随机分布着大小不一的微米量级金字塔结构,金字塔表面覆盖一层 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,金字塔结构塔尖部分的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜有些破碎。本文采用碱性化学刻蚀方法,刻蚀硅片时为各向异性刻蚀,故能在硅片表面刻蚀形成金字塔结构。肉眼可观察到黑硅表面呈现黑灰色,这是由于黑硅表面这种大小不一的金字塔结构可以使入射可见光多次反射,增加对可见光的吸收,减少对可见光的反射。为进一步表征黑硅、微纳米结构硅对可见光的减少反射作用,测试了黑硅、微纳米结构硅的紫外—可见光—近红外反射光谱,并用硅片作对比。图 2 为硅、黑硅、微纳米结构硅的紫外—可见光—红外反射光谱,其中 BaSO<sub>4</sub> 作为测试时的参考,故 BaSO<sub>4</sub> 的反射率为 100%。在波长 400~1 000 nm 范围内,硅的反射率明显高于黑硅和微纳米结构硅,约为 54%,黑硅和微纳米结构硅的反射率分别在 25%和 18%左右,表明黑硅表面的金字塔结构确实有极好的减少反射效果;且微纳米结构硅表面的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层也有进一步的减少反射效果,这与万青教授团队的测试结果一致<sup>[13]</sup>。

图 3(a)~(c)分别为硅、黑硅、微纳米结构硅在 808 nm 激光泵浦作用下的太赫兹时域谱。随着泵浦激光功率的增加,可以观察到硅的太赫兹波强度减小的幅度不是太大,这表明硅调制器对太赫兹波的调制效果一般。对于黑硅,可以发现,随着泵浦激光功率的增加,太赫兹波强度明显减小,特别是在泵浦激光功率较低时,这表明黑硅调制器调制效果较好。随着激光功率的增加,可以发现微纳米结构硅的时域太赫兹强度值减小幅度极大,尤其是在泵浦激光功率较低时,说明其调制效果优于黑硅。

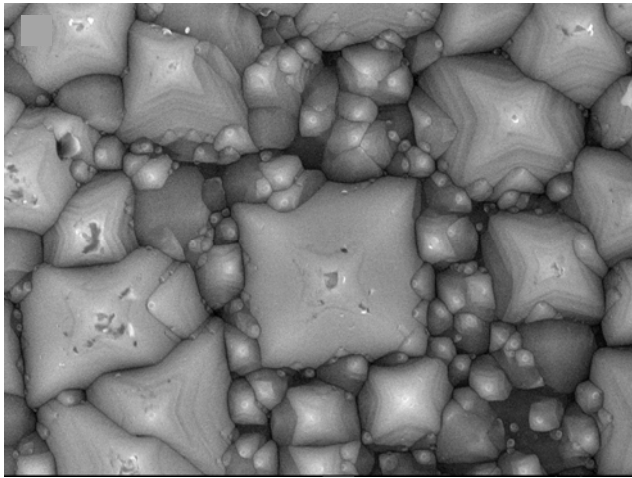


Fig.1 SEM image of micro-nano structured silicon  
图 1 微纳米结构硅的 SEM 图

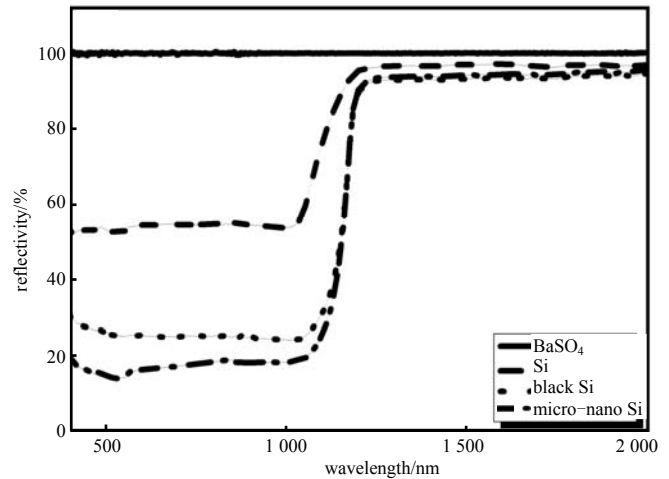


Fig.2 UV-visible-infrared reflection spectrum of bare silicon,black silicon, and micro-nano structured silicon  
图 2 硅、黑硅、微纳米结构硅的紫外-可见光-红外反射光谱

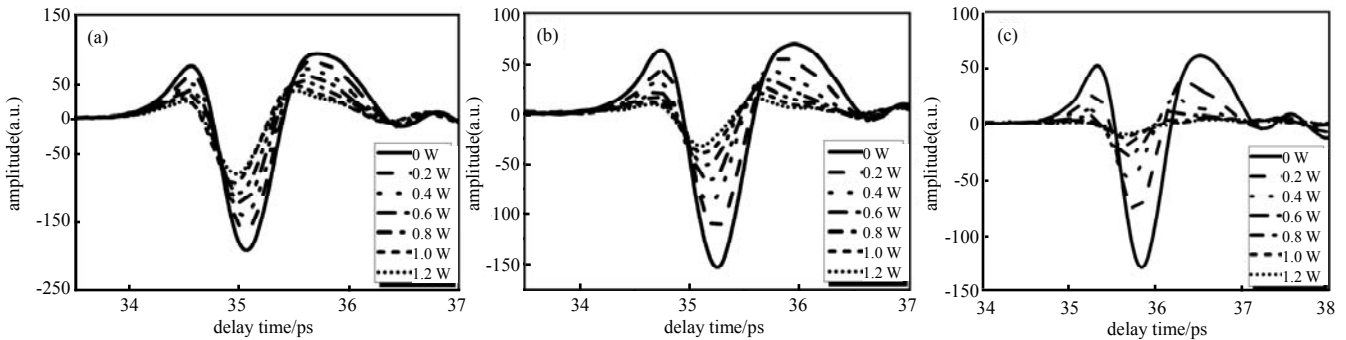


Fig.3 THz time-domain spectrums of (a) the bare Si, (b) the black Si and (c) the micro-nano structured silicon  
图 3 (a) 硅的 THz 时域谱; (b) 黑硅的 THz 时域谱; (c) 微纳米结构硅的 THz 时域谱

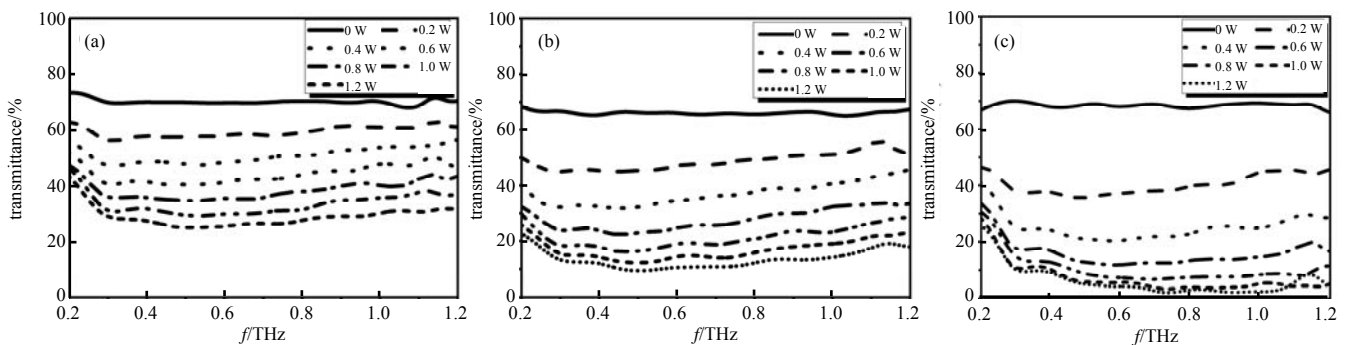


Fig.4 THz transmission spectrums of (a) the bare Si, (b) the black Si and (c) the micro-nano structured silicon  
图 4 (a) 硅的 THz 透射谱; (b) 黑硅的 THz 透射谱; (c) 微纳米结构硅的 THz 透射谱

图 4(a)~(c)分别为硅、黑硅、微纳米结构硅在 808 nm 激光泵浦作用下的太赫兹透射谱。没有激光泵浦作用时，硅、黑硅和微纳米结构硅的太赫兹透射率均在 70%左右。在相同功率的激光泵浦作用下，黑硅的太赫兹透射率明显小于硅，而微纳米结构硅的太赫兹透射率又进一步低于黑硅。尤其是在泵浦激光功率较低(如泵浦激光功率  $\leq 0.4$  W)的情况下，效果更明显，这对于光控太赫兹调制器极为重要。泵浦激光功率为 0.2 W 时，硅的太赫兹透射率在 59%左右，黑硅的太赫兹透射率在 49%左右，而微纳米结构硅的太赫兹透射率在 40%左右；泵浦激光功率为 0.4 W 时，硅的太赫兹透射率在 50%左右，黑硅的太赫兹透射率在 37%左右，而微纳米结构硅的太赫兹透射率在 25%左右；当激光功率为 1.2 W 时，硅的太赫兹透射率在 29%左右，黑硅的太赫兹透射率在 13%左右，而微纳米结构硅的太赫兹透射率在 6%左右。在 1.2 W 的泵浦激光作用下，太赫兹波频率为 0.7~1 THz 时，微纳米结构硅的太赫兹透射率更是低至 2%左右。可以认为，如果继续提高激光功率，微纳米结构硅基本能将太赫兹波关断。

图5为0.2~1.2 THz范围内的平均太赫兹调制深度随泵浦激光功率变化关系图。为直观说明微纳米结构硅调制性能的提高,定义调制深度为 $(T_0 - T_x)/T_0$ ,其中 $T_0$ 和 $T_x$ 分别为泵浦激光功率为0 W和 $x$  W时的透射太赫兹波强度。随着泵浦激光功率的增加,硅、黑硅、微纳米结构硅的太赫兹调制深度均会增加;可以观察到硅的太赫兹调制深度随激光功率的增加几乎呈线性增加,而黑硅和微纳米结构硅的调制深度则随着激光功率的增加先快速增加而后缓慢增加。在相同激光功率下,微纳米结构硅的调制深度最大,其次是黑硅,硅的调制深度最小。激光功率为0.2 W时,硅的平均太赫兹调制深度为15.5%,黑硅和微纳米结构硅则分别为26.3%和41.3%。这种低激光功率下的高调制深度,表明微纳米结构硅对太赫兹波的调制效果很好,这对于光控太赫兹设备是至关重要的。当泵浦激光功率达到1.2 W时,硅的平均太赫兹调制深度仅为59.3%,这对于光控太赫兹调制器远远不够,而黑硅和微纳米结构硅的平均太赫兹调制深度则分别为79.9%和91.2%。相比于半导体硅调制器,黑硅调制器调制性能的提升原因为:a) 由于表面大小不一的金字塔结构减少了对泵浦激光的反射,增加了激光利用率;b) 金字塔结构增加了对太赫兹波的调控面积。相比于黑硅,微纳米结构硅调制性能提升原因为:a) 微纳米结构硅表面的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜可以进一步减少对泵浦激光的反射;b) 根据相关文献资料显示, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜具有钝化作用,能减少表面少数载流子复合,提高少数载流子寿命<sup>[14]</sup>,使硅表面载流子浓度增加,加大了对太赫兹波的吸收,从而提高了调制深度<sup>[15]</sup>,特别是在激光功率较低的情况下。

### 3 结论

本文研究了由微米金字塔阵列和纳米级氧化铝薄膜构成的微纳复合结构对硅基光控太赫兹调制器调制性能的增强效应和机制。通过化学刻蚀方法在高阻硅表面刻蚀形成大小不一的金字塔结构,制造形成黑硅,再利用原子层沉积在黑硅表面镀上一层纳米级 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜。该调制器能显著减小对激光的反射率,对400~1 000 nm波长范围内的激光反射率低至18%;表面的微米金字塔阵列还能增加对太赫兹波的调控面积,具有极其优良的调制性能;在 $95.5 \text{ mW/mm}^2$ 的激光功率密度下,其调制深度可达91.2%。此外,该调制器制造成本低,可工作在较宽的频率范围内,在太赫兹成像和通信领域都有巨大的应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] FEDERICI J, MOELLER L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010,107(11):111101.
- [2] DING L, DING X, YE Y Y, et al. Overview of passive terahertz imaging systems for indoor concealed detection[J]. *Chinese Optics*, 2017,10(1):114-121.
- [3] FUKASAWA R. Terahertz imaging widespread industrial application in non-destructive inspection and chemical analysis[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015,5(6):1121-1127.
- [4] SENSALÉ-RODRIGUEZ B, RAFIQUE S, YAN R, et al. Terahertz imaging employing graphene modulator arrays[J]. *Optics Express*, 2013,21(2):2324-2330.
- [5] XIE Z, WANG X, YE J, et al. Spatial terahertz modulator[J]. *Scientific Reports*, 2013(3):3347.
- [6] SHI Zhongwei, CAO Xingxing, WEN Qiye, et al. Terahertz modulators based on silicon nanotip array[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018,6(2):1700620.
- [7] WEIS P, GARCIA-POMAR J L, HOH M, et al. Spectrally wide-band terahertz wave modulator based on optically tuned graphene[J]. *ACS Nano*, 2012,6(10):9118-9124.
- [8] CHEN Sai, FAN Fei, MIAO Yiping, et al. Ultrasensitive terahertz modulation by silicon-grown  $\text{MoS}_2$  nanosheets[J]. *Nanoscale*, 2016,8(8):4713-4719.
- [9] YOO H K, LEE S G, KANG C, et al. Terahertz modulation on angle-dependent photoexcitation in organic-inorganic hybrid structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2013,103(15):151116.

(下转第17页)

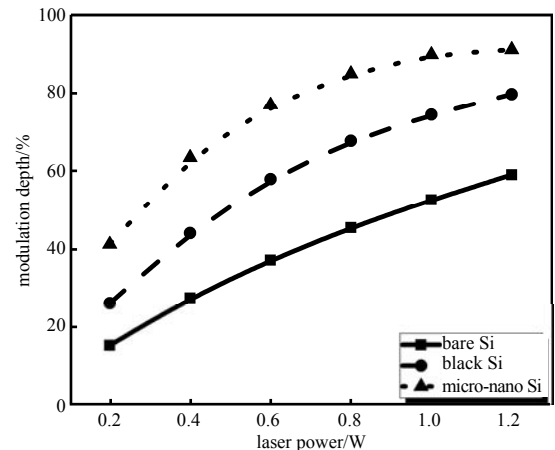


Fig.5 Average THz modulation depth of bare Si, black Si and micro-nano structured silicon from 0.2 THz to 1.2 THz varying with the pumping laser power

图5 硅、黑硅和微纳米结构硅在0.2~1.2 THz的平均THz调制深度随泵浦激光功率的变化