

文章编号: 2095-4980(2019)02-0195-05

硅基金字塔结构光控太赫兹调制器

金 浓, 朱韵樵, 申朝阳, 杨青慧, 张怀武, 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 610054)

摘 要: 提出一种硅基金字塔结构光控太赫兹波调制器。通过化学刻蚀方法在高阻硅基底形成微米级的金字塔结构, 研究该结构与高阻硅片对激光的反射率及对太赫兹的调制情况。实验表明, 金字塔结构可有效降低激光反射率, 提升激光利用率, 并且通过增加太赫兹波调制面积, 达到显著增强太赫兹波的调制效果, 其调制深度达到 90% 以上。该硅基金字塔结构光控调制器可在极低的激光功率下工作, 具有宽带、大幅度调制的特点, 在太赫兹成像领域具有重要应用价值。

关键词: 太赫兹波; 金字塔结构; 调制器; 光控

中图分类号: TN761.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0195

Optical pumping terahertz modulators based on silicon pyramid structure

JIN Nong, ZHU Yunqiao, SHEN Chaoyang, YANG Qinghui, ZHANG Huaiwu, WEN Qiye*

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: An optical pumping terahertz modulators based on silicon pyramid structure is presented. First the micro-scale pyramid structure is etched on high resistance silicon by chemical etching. Then the reflectivity and the terahertz modulation performance of the structure are studied experimentally. Experimental results indicate that pyramid structure can effectively reduce the reflectivity of laser, improve the utilization of laser and significantly increase the modulation depth by increasing the area of the terahertz wave modulation, and the modulation depth is above 90%. This modulator can work at very low laser power and has the characteristics of wide-band and large amplitude modulation, which has important application value in terahertz imaging and communication field.

Keywords: terahertz wave; pyramid structure; modulator; optically tuned

太赫兹波是指频率 0.1~10 THz 范围内的电磁波, 介于毫米波与红外光之间, 波长在 3 mm~30 μm 之间, 处于从电子学向光子学的过渡区^[1-3]。太赫兹波具有独特的瞬态性、宽带性、相干性和低能性等众多优越性能, 因此在短距离无线通信、卫星通信、医学成像、射电天文和遥感雷达等领域具有广阔的应用前景^[4-7]。其中太赫兹成像技术和无线通信技术是当前太赫兹最具潜力的 2 个应用领域。而制约太赫兹技术发展的关键技术除了稳定有效的大功率太赫兹辐射源和探测手段外, 太赫兹功能器件也至关重要。其中, 太赫兹波调控器件是太赫兹技术的核心技术之一。

由于太赫兹波的特殊性, 自然界的大多数物质对太赫兹波都缺乏有效的电磁响应, 而已有的微波和光学响应器件又很难直接应用到太赫兹波段, 导致对太赫兹波的调控十分困难。目前, 太赫兹调制技术研究是太赫兹技术链中的重要课题, 已经成为制约太赫兹实际应用的技术障碍^[8-9]。国内外已经研究了多种材料在太赫兹波调制技术中的应用, 其中具有绝缘态-金属态高速相变特性的二氧化钒(VO_2)材料在太赫兹频段的应用引起了广泛关注, 已经研制出多种太赫兹调控功能器件^[10]。基于 VO_2 的太赫兹调制器具有较大的调制深度和调制带宽, 但由于其温度依赖特性使得调制速率较慢。超材料是一种人工周期性结构材料, 可以与太赫兹波产生强烈谐振, 实现太赫兹波的调控^[11-12]。但基于超材料的调制器存在调制带宽窄(通常在某一个或几个频点), 信号损耗较大等缺点。2013

收稿日期: 2017-11-02; 修回日期: 2018-05-02

基金项目: 国家科学挑战计划资助项目(TZ2018003); 国家自然科学基金资助项目(51572042); 国家国际科技合作专项资助项目(2015DFR50870); 四川省科技支撑资助项目(2014GZ0091; 015GZ0069; 2014GZ0003)

*通信作者: 文岐业 email:qywen@uestc.edu.cn

年, 首都师范大学张岩教授利用激光泵浦本征硅材料, 实现了对太赫兹波的调控^[13]。光泵浦半导体硅的调制方式通常具有大幅宽带调制且易于实现阵列式调控, 是实现太赫兹空间阵列式成像的重要方式^[14]。但硅的折射率很高($n_{Si}=3.4$), 对入射到硅片上的激光产生严重的反射(高达 40%以上), 尤其在短波长激光范围($\leq 700\text{ nm}$), 反射率更是高达 60%, 这需要很大的激光功率才能达到相对较大的调制深度。但大功率激光器不仅增加了系统成本, 而且很大的激光功率所产生的反射光会严重影响整个应用系统的稳定性和安全性, 同时在硅片中所产生的热会使硅调制器的性能发生变化。

本文提出一种硅基金字塔结构光控太赫兹波调制器。通过化学刻蚀方法在高阻硅基底形成微米级的金字塔结构^[15-17]。金字塔结构一方面可以有效降低激光反射率, 增强对泵浦激光的有效吸收, 另一方面还可以增加对太赫兹波的调制面积, 从而增加调制深度。实验证明, 金字塔结构的光控太赫兹调制器可以在半导体连续波激光下有效工作, 在 500 mW/mm^2 激光功率下, 调制深度达到 90%。这在要求大调制深度的太赫兹通信和成像等领域具有重要应用价值。

1 实验

实验中, 选取双面抛光(100)晶向、厚度约为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的低掺杂硅片, 其电阻率要求大于 $1\text{ }000\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^{-1}$, 以保证对太赫兹波的高透性。当电阻率大于 $1\text{ }000\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 硅片内载流子数量已经很少, 此时再增加电阻率对太赫兹波透射率的影响已经不大。严格按照标准步骤清洗硅片, 清洗过程中要求去除自然氧化层以免阻碍后续刻蚀。采用碱法刻蚀, 具体为氢氧化钾(KOH)、异丙醇(IPA)、去离子水按一定比例在一定温度下刻蚀一定时间(KOH 质量百分比约 4%~5%, IPA 体积百分比约 20%。温度为 $85\text{ }^\circ\text{C}$, 反应时间为 15 min)。刻蚀过程中应不时搅拌使反应均匀, 防止产生的气泡阻止刻蚀继续进行。

利用扫描电子显微镜(型号为 FE-SEM, JEOL JSM-7600F)表征金字塔结构样品的表面形貌; 利用紫外-可见-红外分光光度计(erkinelmer Co. Ltd)测试紫外-可见-红外光谱以表征金字塔结构样品的光学反射性能; 利用太赫兹时域谱(THz Time Domain Spectrometer, TDS)系统(美国 Zomega 公司生产的 Fico TDS)测试金字塔结构样品与对比硅片的时域谱和透射谱, 并分析其对太赫兹的响应性能; 利用连续太赫兹源(VDI 公司生产)和高速太赫兹探测器(VDI 公司生产, 型号为 WR2.8ZBD)构建一个基于自由空间传输的太赫兹波动态调制特性测试系统, 如图 1 所示。该系统中太赫兹源中心频率为 0.34 THz , 调制激光由外部加载电调制信号的半导体激光器提供, 其工作波长为 808 nm , 最大功率约 1 W 。严格控制太赫兹测试系统周围环境, 利用抽湿器保证空气湿度在很低水平, 温度保持室温, 避免水汽对实验的影响。

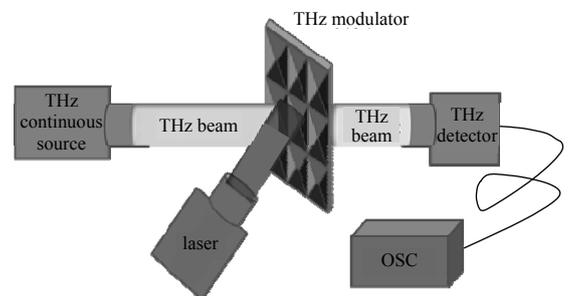


Fig.1 Testing system for optical pumping terahertz modulator
图 1 光控太赫兹调制器性能测试系统

2 结果与分析

碱性刻蚀具有各向异性, 因此硅基表面会形成类四棱锥的金字塔结构。图 2 为刻蚀完成后的表面形貌图。可以看到, 由于化学刻蚀的随机性, 总是从缺陷处优先刻蚀, 因此金字塔结构分布也是随机的, 且大小不一, 边长从 $5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 不等。但从整体看, 刻蚀后硅片表面结构致密, 肉眼观察表面可看到明显的灰黑色, 对可见光的反射率大大降低。这主要是由于金字塔结构使入射光能够进行多次反射与吸收, 其中多次反射的次数决定了减反的程度, 反射次数越多, 减反效果越好。金字塔结构尺寸由于是化学刻蚀随机得到, 很难有具体的仿真模型, 一般通过相似模型计算来证明对可见光的减反效果^[18]。

为进一步说明金字塔结构对激光的高吸收性能, 用紫外-可见-红外分光光度计对金字塔样品进行测试, 图 3 是金字塔结构样品的紫外-可见-红外光谱图。晶体硅对波长范围为 $250\sim 1\text{ }100\text{ nm}$ 内的光都具有很高的反射率, 尤其是在紫外波段, 反射率最高达到了 65%。这是由晶体硅表面与空气界面的折射率突变引起的。而从图中可以看到, 刻蚀金字塔结构以后, 波长在 $250\sim 1\text{ }100\text{ nm}$ 范围内的波反射率都远低于硅片, 最低处约 12%左右。由于硅片对波长在 $250\sim 1\text{ }100\text{ nm}$ 范围内的光波的透射率为零, 根据 $A=1-R-T$ (其中 A 代表吸收率, R 代表反射率, T 代表透射率)可知, 随着反射率降低, 吸收率会增加, 因此金字塔结构能够大幅增加对激光的吸收效率。即很小的激光功率照射就可以产生大量的光生载流子, 从而实现对太赫兹波的大幅度调制作用。

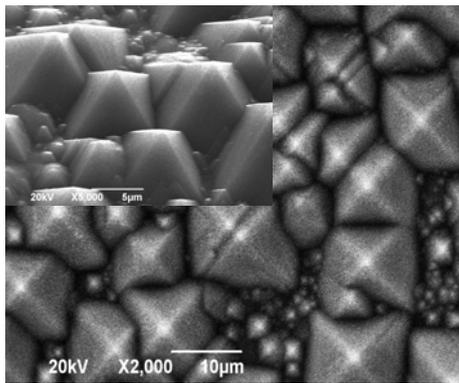


Fig.2 SEM image of pyramid structure
图 2 金字塔结构 SEM 图

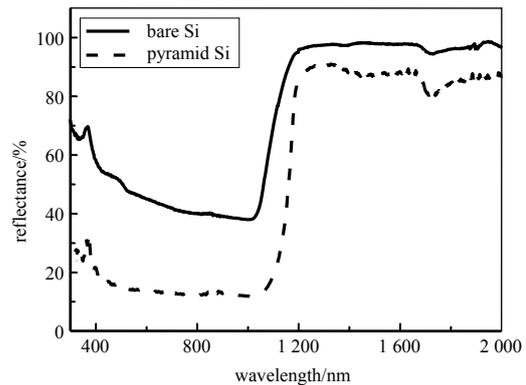


Fig.3 Reflectance spectra of pyramid structure and contrast silicon
图 3 金字塔结构与对比硅片紫外-可见-红外光谱图

图 4 是不同激光功率下对比硅片与金字塔结构样品的太赫兹时域光谱测试结果, (a)为对比硅片的时域谱, (b)为金字塔结构样品的时域谱, 对测得的脉冲信号做傅里叶变换可得到透射太赫兹波的振幅与相位等信息。本测试中采用干燥空气作为参考谱, 所获得的硅片和金字塔结构样品的太赫兹透射谱分别如图 5(a)和(b)所示。在时域谱中可以看到, 增加激光功率(从 0~1 W)时, 硅片时域谱峰峰值变化并不大, 而金字塔结构样品则有很明显的变化。相同激光功率下, 金字塔结构样品变化值更大, 说明金字塔结构样品调制效果更好。从透射谱中可以直接读出数据, 对比更明显: 在未加激光时, 硅片与金字塔结构样品对太赫兹波的透射率差别不明显, 均为 70%左右; 而当施加激光时, 在相同激光功率下, 金字塔结构样品的透射率远小于对比硅片。当激光功率增加到 1 W 时, 硅片的透射率为 40%, 而金字塔结构样品在 0.4 W 时透射率就已经降到 40%以下, 接近 30%。如果调制深度用透射率改变量与未加激光时透射率的比值表示, 在 1 W 时, 硅片调制深度约 42.9%, 金字塔结构样品调制深度达到 90%。事实上, 在激光功率达到 0.6 W 时, 金字塔结构样品的调制深度已经达到 75%以上, 超过该功率后, 调制深度增加幅度明显降低。而在低功率下, 金字塔结构调制深度迅速降低, 下降幅度很大。可见, 基于金字塔结构的调制器可以在很低激光功率下工作, 且调制性能突出, 远远优于普通高阻硅片。

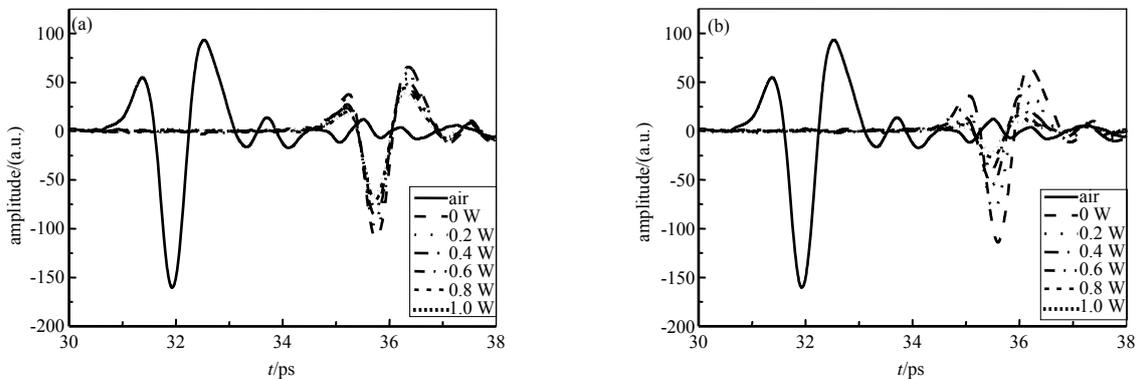


Fig.4 (a) THz time domain spectrum of high resistivity silicon and (b) THz time domain spectrum of pyramid structure
图 4 高阻硅 THz 时域谱(a)和金字塔结构 THz 时域谱(b)

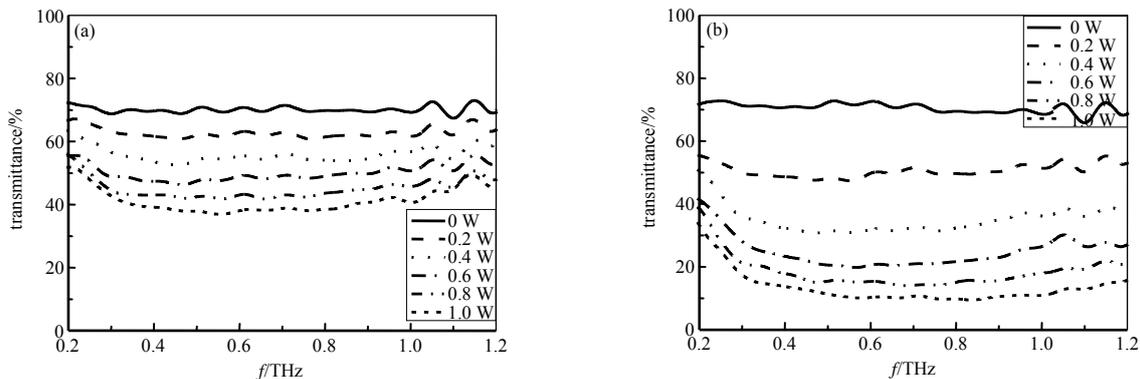


Fig.5 (a) THz transmission spectrum of high resistivity silicon (b) THz transmission spectrum of pyramid structure
图 5 高阻硅 THz 透射谱(a)和金字塔结构 THz 透射谱(b)

当一定波长的激光作用于硅片时,硅片内部会产生光生载流子,从而阻止太赫兹波的透过。通过控制激光功率来调控光生载流子浓度,从而实现对太赫兹波的调控。基于这一原理,利用金字塔陷光结构能够捕捉绝大部分的激光,极大提高激光利用率,使得很小的激光功率就可以产生大量的光生载流子;另一方面,与硅相比,金字塔结构表面积大大增加,使得调制面积增加。因此可以认为金字塔结构能够增加调制深度且可以工作在小功率激光下,这与实验完全相符。事实上,金字塔结构除了可以增加激光吸收率外,还为光生载流子提供了足够的存在空间。如纳米结构,虽然可以有更好的光吸收性能,但由于光生载流子大多存在于细小的纳米空间内,数量上并没有太大优势,因此纳米结构的调制器调制效果有所降低。

为了测试金字塔样品的动态调制性能,按图 1 所示搭建了测试系统。通过信号源输出脉冲信号给激光器,驱动激光器输出高速变化的调制激光束;调制激光作用在调制器上实现对太赫兹波的动态调制;最后通过太赫兹检波器获得太赫兹波的电压值,并由示波器直接显示出动态电压信号。通过调制幅度、调制波形以及开关时间的上升沿和下降沿,可以获得器件的调制特性,图 6 为 10 kHz 和 20 kHz 时硅片与金字塔样品的测试结果。实验中,太赫兹源中心频率为 340 GHz,激光波长为 915 nm。可以看到,在 340 GHz 固态源下,金字塔结构的透射率大于硅片,这是因为硅片在太赫兹波段的透射率会出现周期性振荡现象,而硅刻蚀金字塔结构后,由于厚度变化,振荡位置会发生偏移,在 340 GHz 时,金字塔结构透射率正好大于硅片。在 10 kHz,20 kHz 时,金字塔结构样品调制深度都大于硅片,尤其是在 10 kHz 时,金字塔结构样品优势非常明显,而且调制波形为方形,信噪比良好。在 20 kHz 时,调制深度都有所降低且方波波形向三角波形变化,波形开始出现失真。这是由于速率增加后,硅内部载流子产生复合时间跟不上激光的变化速度。在加激光时,光生载流子数量开始增加;当关闭激光时,内部光生载流子数量还未完全达到静态时加载同样功率激光所产生的载流子数量时,载流子的产生已经停止。这样,太赫兹波的透射率降低幅度会变小,导致调制深度随调制速率增加而下降,波形也会因此出现失真,向三角波转化。硅片调制深度下降幅度比金字塔结构小,因为硅片在该激光功率照射下光生载流子数量本身较少,在激光变化时间内载流子数量变化不大,差距没有金字塔结构明显。可见,在 340 GHz 连续源作用下,金字塔结构样品在调制深度上明显优于普通高阻硅片,但在调制速率方面,金字塔结构并没有显示出明显优势。这是因为调制速率主要受限于载流子产生复合速率即载流子寿命,而载流子寿命和材料本身有关,刻蚀过程并不会改变载流子寿命,因此调制速率并没有明显优势。而对于太赫兹成像领域,主要侧重于调制深度与衰减问题,这一速率可以满足需求。另外可以通过点阵掺杂 Au,Pt 等方式降低载流子寿命,增加调制速率。通过后续工作,有望研制出高高速调制深度的调制器。

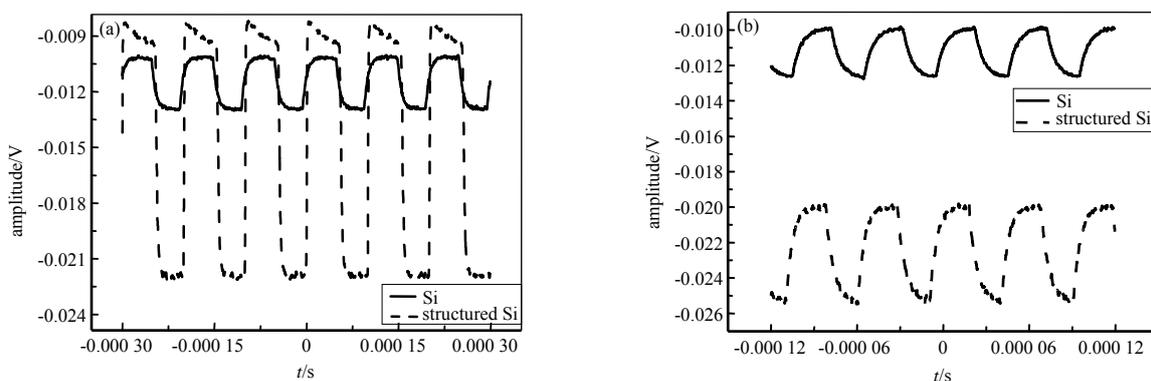


Fig.6 (a) Modulation rate of Si and pyramid structural samples at 10 kHz and (b) the modulation rate of Si and pyramid structural samples at 20 kHz
图 6 高阻 Si 和金字塔结构样品在 10 kHz 的波形(a)以及高阻 Si 和金字塔结构样品在 20 kHz 的波形(b)

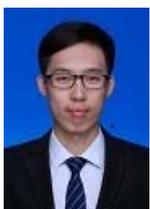
3 结论

本文通过实验研究了一种硅基金字塔结构的光控太赫兹调制器。通过湿法刻蚀的方式,在高阻硅表面刻蚀出金字塔结构,该结构能够捕获绝大多数可见光,从而极大提升对激光的利用率,使得该结构调制器能够在很小的激光功率下工作,且能获得很大的调制深度。此外,因为硅材料没有频率选择特性,因此该调制器可工作在较宽的频段,且具有极化不敏感、成本低、易实现等特性。将该调制器进行点阵掺金等工艺可以提升调制速率。该调制器可与光调制器耦合,用于太赫兹空间成像领域。

参考文献:

- [1] KAKIMI R, FUJITA M, NAGAI M, et al. Capture of a terahertz wave in a photonic-crystal slab[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8):657–663.
- [2] LLOYD-HUGHES J, JEON T I. A review of the terahertz conductivity of bulk and nano-materials[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(9):871–925.
- [3] FEDERICI J, MOELLER L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(11):111101.
- [4] 李少谦, 陈智, 文岐业, 等. 太赫兹通信技术导论[M]. 北京:国防工业出版社, 2016. (LI Shaoqian, CHEN Zhi, WEN Qiye, et al. *Introduction to terahertz communications*[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2016.)
- [5] KLEINE-OSTMANN T, NAGATSUMA T. A review on terahertz communications research[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, 32(2):143–171.
- [6] KAINDL R A, CARNAHAN M A, HÄGELE D, et al. Ultrafast terahertz probes of transient conducting and insulating phases in an electron-hole gas[J]. *Nature*, 2003, 423(6941):734–738.
- [7] SENSALÉ-RODRIGUEZ B, RAFIQUE S, YAN R, et al. Terahertz imaging employing graphene modulator arrays[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2):2324–2330.
- [8] WEN Qiye, ZHANG Yan, CHANG Shengjiang, et al. *Terahertz technology and applications*[M]. Chengdu, Sichuan, China: Press of University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [9] RAHM M, LI J S, PADILLA W J. THz wave modulators: a brief review on different modulation techniques[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, 34(1):1–2.
- [10] WEN Q Y, ZHANG H W, YANG Q H, et al. A tunable hybrid metamaterial absorber based on vanadium oxide films[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(23):235106.
- [11] LARSEN K, AUSTIN D, SANDALL I C, et al. Electrical modulation of the optical properties of mid-infrared metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(25):251109.
- [12] ZHOU Qingli, SHI Yulei, WANG Aihua, et al. Transient optical modulation properties in the terahertz metamaterial of split ring resonators[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(5):058701.
- [13] XIE Z, WANG X, YE J, et al. Spatial terahertz modulator[J]. *Scientific Reports*, 2013(3):3347.
- [14] CHAN W L, CHEN H T, TAYLOR A J, et al. A spatial light modulator for terahertz beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(21):213511.
- [15] STEPHENS R B, CODY G D. Optical reflectance and transmission of a textured surface[J]. *Thin Solid Films*, 1977, 45(1):19–29.
- [16] YANG C R, CHEN P Y, CHIOU Y C, et al. Effects of mechanical agitation and surfactant additive on silicon anisotropic etching in alkaline KOH solution[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 119(1):263–270.
- [17] JIANG J, LI S B, JIANG Y D, et al. Mechanism of optical absorption enhancement of surface textured black Silicon[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2013, 24(2):463–466.
- [18] 吴文威, 徐嘉明, 陈宏彦. “黑硅”表面特殊锥状尖峰结构的制备及其光学模型仿真[J]. *中国激光*, 2011, 38(6):246–250. (WU Wenwei, XU Jiaming, CHEN Hongyan. Simulation of optical model based on micro-cones structure of “black Silicon”[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6):246–250.)

作者简介:



金 浓(1992–), 男, 山西省河曲县人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹光控调制器、太赫兹空间成像等 .email:646509144@qq.com.

杨青慧(1979–), 女, 辽宁省阜新市人, 教授, 主要研究方向为太赫兹波传输特性与磁光子晶体波导。

文岐业(1976–), 男, 广西省桂林市人, 教授, 博导, 主要研究方向为太赫兹波传输与调控理论、太赫兹功能器件与系统应用。

朱韵樵(1993–), 男, 四川省广元市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹成像、压缩感知等。

申朝阳(1994–), 男, 四川省南充市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹调控器件、太赫兹相关功能器件等。

张怀武(1959–), 男, 陕西省汉中市人, 教授, 主要研究方向为电子薄膜与集成器件、磁性材料与元器件和太赫兹波传输理论。