

基于硅基石墨烯的全光控太赫兹波强度调制系统研究

彭龙瑶^{1,2}, 钟森城^{1,3}, 朱礼国^{1,3}, 孟坤^{1,3}, 刘乔^{1,3}, 彭其先¹,
赵剑衡^{1,3}, 张蓉竹², 李泽仁^{1,3}

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064;

3. 中国工程物理研究院太赫兹科学技术研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在太赫兹通信等系统中需要利用太赫兹波调制器对信号进行调制。基于 GaAs 等传统半导体材料设计和制作的调制器在太赫兹波段的响应过低, 因而很难应用于太赫兹系统。为了弥补传统调制技术在带宽和调制深度不够的缺点, 设计了一种全新的基于硅基石墨烯的全光控太赫兹强度调制系统。该调制系统利用材料中光生载流子对太赫兹波的吸收特性, 通过调节照射到材料上的可见光光强来改变光生载流子浓度, 从而实现对太赫兹波强度调制。从理论和实验两方面对这种新型太赫兹强度调制系统的调制深度和调制带宽进行了研究。研究表明, 在泵浦光功率密度为 18 mW/mm² 时, 该调制系统能在实验使用的 THz-TDS 测试系统(0.1~2.5 THz)的整个频谱范围内进行有效的调制, 调制深度可达到 12%。且随着泵浦光能量的增大, 调制深度增大。

关键词: 太赫兹波; 石墨烯; 太赫兹强度调制器; 光生载流子; 调制深度; 透射率谱

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0974-05

Graphene-on-silicon based all-optically-driven terahertz wave intensity modulation

Peng Longyao^{1,2}, Zhong Sencheng^{1,3}, Zhu Liguo^{1,3}, Meng Kun^{1,3}, Liu Qiao^{1,3}, Peng Qixian¹,
Zhao Jianheng^{1,3}, Zhang Rongzhu², Li Zeren^{1,3}

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

3. Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Most of terahertz (THz) systems and their application require THz modulator to modulate THz signals. Photoelectric modulators at present are made and produced by semiconductor-based, such as GaAs, materials. But unfortunately, due to their limited response to THz wave, these modulators based on traditional semiconductors are not suitable for THz systems. To overcome the limitation on modulation bandwidth and depth, a new scheme of THz wave intensity modulation system was proposed, which was based on all optically tuned graphene on silicon (GOS). This new modulation system was realized by

收稿日期: 2014-07-11; 修订日期: 2014-08-15

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金重点项目(2012A0401016); 国家自然科学基金(61205100)

作者简介: 彭龙瑶(1988-), 女, 硕士生, 主要从事激光技术与太赫兹光谱技术方面的研究。Email: pengly9191@sina.cn

导师简介: 张蓉竹, 女, 教授, 主要从事光学精密检测及光电子技术方面的研究。Email: zhang_rz@scu.edu.cn

朱礼国, 男, 副研究员, 主要从事太赫兹与激光光谱成像方面的研究。Email: zhuliguo@tsinghua.org.cn

photo-induced free carrier, which can absorb THz waves. By controlling light intensity which incident on modulator, photo-induced carrier density could be tuned, and even transmitted THz wave intensity was modulated. In this work, the fundamental properties of this THz intensity modulator was theoretically and experimentally studied, such as modulation depth and bandwidth. Our experiment results also show that it has a wide modulation bandwidth, which can modulate efficiently THz wave in THz-TDS of frequency range from 0.1 to 2.5THz, and the typical modulation depth is 12% at an optical pump fluence of 18mW/mm². what's more, the modulation depth increases with increasing optical pump fluence.

Key words: THz waves; graphene; terahertz modulator; photo-induced carrier; modulation depth; transmittance spectrum

0 引言

太赫兹波在生物医学诊断、军事探测、机场安全成像、高速通信等方面具有广阔的应用前景^[1]。近年来,太赫兹发射和探测技术都有了很大的发展^[2-4],为太赫兹应用系统提供了合适的太赫兹光源和探测器。作为太赫兹信号加载的关键,太赫兹强度调制技术的相关研究却相对滞后。现在常用的光电调制器大多采用 GaAs 等半导体材料制作,其技术成熟、性能稳定,在光电领域得到了广泛地应用。然而这些基于传统半导体材料的调制器在太赫兹波段响应特性较差,具体体现在调制带宽窄、速度慢,因此很难应用于太赫兹系统,这也使得太赫兹调制技术成为太赫兹应用技术发展的一个瓶颈。

太赫兹强度调制器按调制方式可分为两类^[5]:电控太赫兹强度调制器和光控太赫兹强度调制器。电控太赫兹强度调制器利用半导体电极吸收太赫兹波,通过对半导体电极的充放电过程实现对太赫兹波强度调制^[6]。由于电极本身即使在未充电的情况下也带有大量自由电子,对太赫兹波有明显的吸收作用,从而给调制器引入严重的插入损耗。另外,由于采用 IC 回路充放电过程来实现强度调制,使得电控太赫兹波强度调制器的响应速度受到了极大的限制。光控太赫兹强度调制技术^[7]利用可见光直接照射本征半导体产生自由电子吸收太赫兹波,通过调节入射可见光强度来实现对太赫兹波强度调制;由于采用本征半导体不吸收太赫兹波并且没有 IC 回路,因此可以克服电控太赫兹调制技术中插入损耗高和调制速度受限的缺点。

现阶段光控太赫兹强度调制技术采用的基底材料多为传统半导体材料^[7]和金属绝缘体相变材料^[8]。由于材料中光生载流子碰撞频率小于 1 THz^[9],因此限制了系统的调制带宽。另外,材料中光生载流子寿命太长^[10],限制了调制速度。此外,为了提高太赫兹波调制深度,现有的光控太赫兹强度调制系统都是采用飞秒脉冲激光作为调制光源。这使得这种调制技术只能用于基于飞秒激光的太赫兹系统,而无法应用于其他的太赫兹通信系统。

此文提出了基于硅基石墨烯的全光控太赫兹波强度调制系统,采用石墨烯作为基底材料并采用连续可见光作为泵浦光源。由于采用的石墨烯材料具有载流子碰撞频率高、载流子寿命短等特点^[11-14],能够有效地提高调制器的调制带宽^[13]和调制速度。另外使用连续可见激光代替飞秒激光作为泵浦光源,大大扩展了光控太赫兹强度调制技术的使用范围,使其可应用到包括太赫兹通信系统等在内的自由空间传输太赫兹系统。

1 基本原理及结构

基于硅基石墨烯的全光控太赫兹波强度调制系统采用波长为 532 nm 的连续激光作为泵浦光源,硅基石墨烯作为基底材料在激光照射下吸收入射的太赫兹波。调制器结构如图 1(a),由单层的石墨烯层和硅基底组成。单层石墨烯层是将石墨烯采用化学气相沉积法(即 CVD 法)生成。将单层石墨烯通过一步转移的方法转移到硅基底上,形成硅基石墨烯结构。石墨烯是一种没有能隙的半导体,具有高速载流子迁移率^[15-16](电子迁移率超过 15 000 cm²/(V·s))、载流子

寿命短以及宽光谱等特性。因此,采用石墨烯材料制作的调制器具有调制速度快、调制带宽宽等优点。实验所使用的调制器大小为 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$, 硅基底厚 1 mm 。调制器表面电阻小于 $600\ \Omega/\text{m}^2$, 透过率大于 95% , 单层比率大于 90% 。

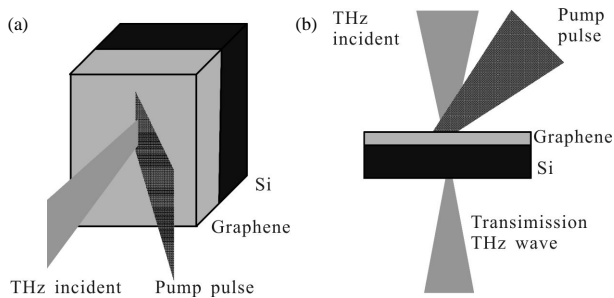


图 1 太赫兹调制器的结构(a)及调制原理(b)示意图

Fig.1 Device structure(a) and schematic diagram(b) of THz modulator

太赫兹波强度的调制原理如图 1(b)所示。太赫兹波聚焦后入射到硅基石墨烯调制器上,调制器位于太赫兹波焦点处。同时采用波长为 532 nm 的激光入射到硅基石墨烯调制器上作为泵浦激光,且泵浦激光光斑覆盖太赫兹光斑。调制器受泵浦激光辐照,吸收光子产生光生载流子。光生载流子在入射的太赫兹电场驱动下运动,在运动中通过与其他粒子相互碰撞、散射等作用将太赫兹波电场能量转化为热量,这个过程导致太赫兹波经过该调制器后被吸收^[17],可以近似认为太赫兹波的衰减正比于光生载流子密度^[18]。因此,通过调节泵浦激光能量来控制调制器中光生载流子的浓度就可以实现对太赫兹波的强度调制。

调制器对太赫兹波的透射率可以用 $I_S(\omega)$ 和 $I_R(\omega)$ 的比值来确定:

$$T(\omega) = \frac{I_S(\omega)}{I_R(\omega)} = \left[\frac{E_S(\omega)}{E_R(\omega)} \right]^2 \quad (1)$$

式中: $E_R(\omega)$ 和 $E_S(\omega)$ 分别是调制前和调制后的太赫兹波的振幅谱。

当调制激光能量增大时,光生载流子浓度增大。根据自由电子的 Drude 模型,电介质的虚部复电导率增大,则吸收系数增大。太赫兹经过调制器时,吸收增大,透射太赫兹波电场幅度变小,则其傅里叶变化后的 $E_S(\omega)$ 变小。从公式(1)可以得到随调制激光能量增大,太赫兹调制器的透射率变小。

笔者定义调制器的调制深度:

$$M = (E_o - E_p) / E_o \quad (2)$$

式中: E_o 为无泵浦光时的透射太赫兹电场幅度的峰值; E_p 有泵浦光照射时的透射太赫兹波电场幅度的峰值。当泵浦光能量增大时, E_p 变小。根据公式(2)可得调制深度 M 相应地增大。因此,随着调制激光能量增大,调制深度 M 增大,可以通过控制激光的光强来实现对太赫兹强度进行调制。

2 实验

为了对所设计的这种新型太赫兹强度调制器的调制深度和调制带宽进行测试,笔者利用太赫兹时域光谱系统进行了实验研究。图 2(a)为实验采用的光路示意图,图 2(b)则是实验装置实物图。图 2(a)中 Laser 是飞秒激光, HWP 是 $1/2$ 波片, QWP 表示 $1/4$ 波片, M 表示平面反射镜, PM 表示离轴抛物面镜, L 表示透镜, BS 表示格兰棱镜, PBS 是沃拉斯顿棱镜, Stage 表示电动平移台, Chopper 表示斩波器, Detector 表示平衡光电二极管, Pump Laser 表示泵浦激光。实验中采用飞秒激光脉冲激发光导天线(THz generator)产生太赫兹电磁波。利用抛物面镜将太赫兹波聚焦到硅基石墨烯调制器(THz modulator)上。同时采用泵浦激光(Pump laser)激发调制器,被调制的太赫兹波穿过调制器被抛物面镜汇聚,并利用 ZnTe 晶体的电光效应(THz detector)对被调制的太赫兹波波形探测。由于水对太赫兹波有强烈的吸收作用,因此为了排除水蒸气的影响,在实验过程中加密封罩并冲入氮气,使罩内湿度小于 4.5% , 调制器样品附近的温度为 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

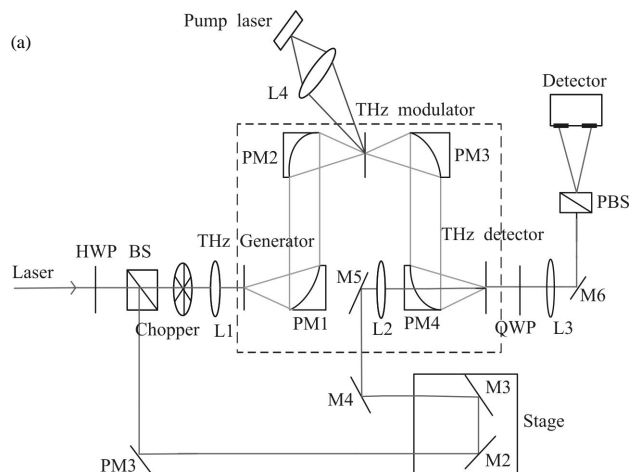




图 2 太赫兹强度调制系统(a)光路示意图(b)实验装置实物图

Fig.2 Fabrication and experimental operation of photo-designed THz modulator devices(a)schematic of experiment optical path(b) photo of experiment system

硅基石墨烯调制器置于太赫兹焦斑的位置,采用 532 nm 的 YAG 激光器作为泵浦光。在调制器上泵浦光聚焦的焦斑位置与太赫兹焦斑位置重合,且前者光斑比后者光斑大接近一倍(实验中采用刀口测量法测得泵浦光在调制器上的聚焦光斑大小,约为 2 mm,聚焦到调制器上的太赫兹波光斑大约为 1 mm)。分别获取调制前后的太赫兹波强度,从而得到对应的太赫兹脉冲的时域波形。太赫兹波的时域光谱包含了调制信号的振幅信息和相位信息。然后对时域波形进行傅里叶变换得到太赫兹脉冲的频域光谱($E_R(\omega)$ 和 $E_S(\omega)$)。根据公式(1)和(2)可以计算得到太赫兹波经过调制器的透射率($T(\omega)$)和调制深度(M)。

图 3 为实验测得的太赫兹时域波形图与频谱图。图中曲线分别表示不同能量泵浦光照到硅基石墨烯上时透射的太赫兹波形图。笔者将未被调制的太赫兹波形图(图中为光强为 0 时的太赫兹时域波形)作为参考来对调制后的波形变化进行分析。泵浦激光的强度对输出太赫兹波的强度具有直接的影响,调制曲线从上至下,泵浦光强度依次增强,太赫兹波的透射强度依次减弱。在实验中,为获取不同

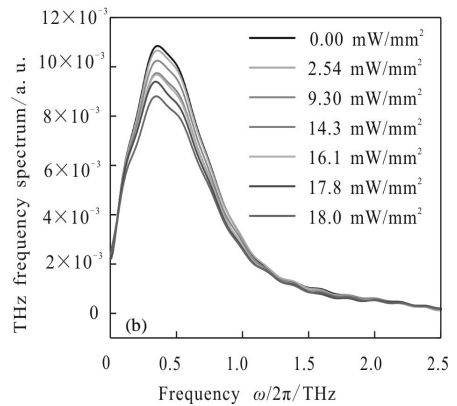
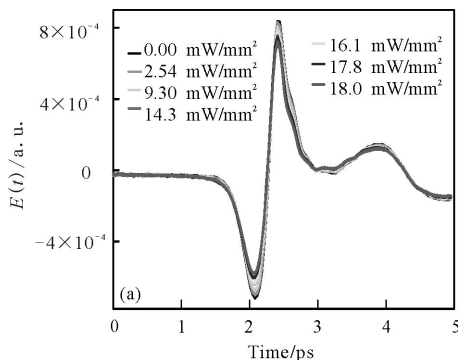


图 3 不同光照下太赫兹时域波形图(a)和频谱图(b)

Fig.3 THz signal (a) and frequency spectrum (b) for different illumination intensities

泵浦激光功率密度对太赫兹调制的影响,采用的泵浦光功率密度从 0(未调制)增加到 18 mW/mm²。

通过计算透射太赫兹波的强度峰值大小,可以得到当泵浦激光从 0 依次增大到 18 mW/mm² 时调制深度分别达到 0%、2%、5%、6.5%、7%、9%、12%。在泵浦激光功率密度为 18 mW/mm² 时,所设计的基于硅基石墨烯的全光控太赫兹强度调制器对太赫兹波的调制度可达到 12%。图 4 为调制器对太赫兹波的调制深度随调制激光功率密度的变化情况。从图中可以看出,能量越大, E_p 越小,调制深度 M 越大。且随着泵浦光能量的增大,调制深度近似线性增大。

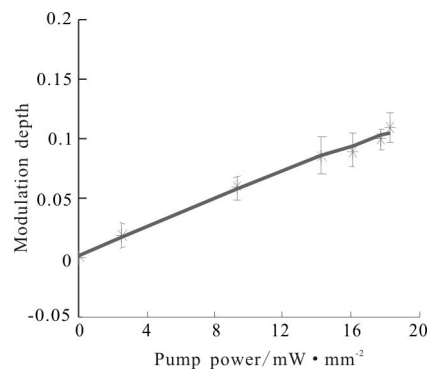


图 4 太赫兹调制深度随泵浦光能量变化图

Fig.4 THz modulation depth as a function of optical pump power

图 5 为通过傅里叶变换得到的太赫兹波透射率频谱图。从图中可以看出,随着泵浦激光的增大,太赫兹透射率变小。另外,图中表明所设计的硅基石墨烯调制器能对实验所采用的 THz-TDS 测试系统

(0.1~2.5 THz)的整个频谱范围的太赫兹波进行有效调节,说明该系统具有宽谱特性。

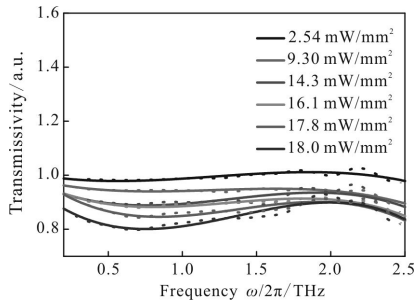


图 5 不同光照下太赫兹透过率频谱图

Fig.5 THz spectral transmittance for different illumination intensities

3 结论

此文提出了一种全新的基于硅基石墨烯的全光控太赫兹强度调制系统, 所对其调制机理进行了分析, 并且利用太赫兹时域光谱系统对所设计的太赫兹强度调制系统的调制带宽进行了研究。结果表明, 硅基石墨烯调制系统具有宽光谱太赫兹传输调制特性, 在文中采用的 0.1~2.5 THz 的 THz-TDS 测试系统的整个频谱范围内能进行有效调制。该调制系统有别于目前利用飞秒激光调制的光控太赫兹强度调制技术, 采用连续波可见光对太赫兹波进行调制; 实验证明, 该技术调制深度大。例如, 调制激光功率密度为 18 mW/mm^2 时, 其调制深度达到 12%, 且随着调制激光能量的增大, 调制深度增加。

参考文献:

- [1] Tonouchi Masayoshi. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Gwyn P Williams. Filling the terahertz gap-high power sources and applications [J]. *Rep Prog Phys*, 2006, 69(2): 301-326.
- [3] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nat Mater*, 2002, 1(1): 26-33.
- [4] Siegel P H. Terahertz technology[J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 2002, 50(3): 910-928.
- [5] Marco Rahm, Li Jiusheng, Willie J Padilla. THz wave modulators; a brief review on different modulation techniques[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 34: 1-27.
- [6] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Kelly M M, et al. Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions [J]. *Nat Commun*. 2012, 3: 780.
- [7] Takanori Okada, Koichiro Tanaka. Photo-designed terahertz devices[J]. *Scientific Reports*, 2011, 1: 121.
- [8] Chen Changhong, Zhu Yanhan, Zhao Yong, et al. VO_2 multidomain heteroepitaxial growth and terahertz transmission modulation [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(21): 211905-211905-3.
- [9] Tae-In Jeon, D Grischkoysky. Nature of conduction in doped silicon[J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 1106-1109.
- [10] Tang Hao, Zhu Ligu, Zhao Liang, et al. Carrier dynamics in Si nanowires fabricated by metal-assisted chemical etching [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(9): 7814-7819.
- [11] Giriraj Jnawali, Rao Yi, Yan Hugen, et al. Observation of a transient decrease in terahertz conductivity of single-layer graphene induced by ultrafast optical excitation [J]. *Nano Lett*, 2013, 13: 524-530.
- [12] George P A, Strait J, Dawlaty J, et al. Ultrafast optical-pump terahertz-probe spectroscopy of the carrier relaxation and recombination dynamics in epitaxial graphene [J]. *Nano Lett*, 2008, 8(12): 4248-4251.
- [13] J M Dawlaty, S Shivaraman, J Strait, et al. Measurement of the optical absorption spectra of epitaxial graphene from terahertz to visible [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(13): 131905.
- [14] Liu Ming, Yin Xiaobin, Erick Ulin Acila, et al. A graphene-based broadband optical modulator[J]. *Nature*, 2011, 474: 64-67.
- [15] Efetov D K, Kim P. Controlling electron-phonon interactions in graphene at ultrahigh carrier densities [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105(25): 256805.
- [16] Bolotin K I, Sikes K J, Jiang Z, et al. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene[J]. *Solid State Communications*, 2008, 146(9/10): 351-355.
- [17] Zhu Ligu. Terahertz spectroscopy and its applications on study of carrier dynamics [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
朱礼国. 太赫兹光谱系统及其在载流子动力学研究中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [18] Martin Dressel, George Grüner. Electrodynamics of Solids [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.