

文章编号: 2095-4980(2014)04-0481-06

石墨烯太赫兹调制器及 330 GHz 无线通信系统

刘海涛^a, 文岐业^a, 杨青慧^a, 陈智^b, 孙丹丹^a, 田伟^a, 张怀武^a(电子科技大学 ^a.电子薄膜与集成器件国家重点实验室; ^b.通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要: 现有太赫兹无线通信系统通常采用微波倍频或直接调源的方式。本文从太赫兹波空间调制技术出发, 研究了一种基于直接调制技术的太赫兹无线通信系统。重点探索了一种基于石墨烯/半导体硅的复合结构(GOS), 研究出调制速率达到 1 MHz, 调制深度 50%以上, 工作频带覆盖 0.2 THz~2 THz 频段的新型全光学太赫兹调制器。在此基础上, 构建了 330 GHz 载波频率的太赫兹无线通信系统, 实现了 1 Mbps 的通信速率。

关键词: 太赫兹通信; 330 GHz; 石墨烯; 太赫兹调制器

中图分类号: TN29

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201404.0481

Graphene terahertz modulator and 330 GHz wireless communication system

LIU Hai-tao^a, WEN Qi-ye^a, YANG Qing-hui^a, CHEN Zhi^b, SUN Dan-dan^a, TIAN Wei^a, ZHANG Huai-wu^a

(a.State key laboratory of electronic thin films and integrated devices; b.Key laboratory of communication anti-jamming technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: Currently, there are two methods to develop terahertz wireless communication system. One way is to use the microwave frequency doubling technology. Another approach is to direct modulate THz source. In this paper, different from both, we study a terahertz wireless communication system based on spatial direct modulation mode. We focus on exploring the structure of combining silicon and graphene(Graphene on Silicon, GOS), and have developed a new type of terahertz modulator with 1 MHz modulation rate, over 50% modulation depth and 0.2–2 THz frequency band. According to this study, we design and build a 330 GHz terahertz wireless communication system, and the system has achieved a communication rate of 1 Mbps.

Key words: terahertz communication; 330 GHz; graphene; terahertz modulator

随着网络技术、计算机技术、电子技术以及高清视频业务的发展, 人们对高速无线通信传输带宽的需求日益增加。根据Edholm带宽定律, 人们对于无线短距离通信的带宽需求基本每隔18个月翻一番^[1]。为了满足日益增长的带宽需求, 可以采用更先进的调制技术提高频带利用率^[2], 或者通过采用多种复用方式来增加信道容量^[3]。但香农定理告诉我们, 这种方法提供的数据传输能力依旧有限。为了提供足够的通信带宽, 采用更高的载波频率成为必需途径, 这就要求拓展到太赫兹波频段^[4]。因此, 研究太赫兹频段通信成为下一代无线短距离通信的重要研究课题^[5-7]。

目前对于太赫兹无线通信系统研究通常可以分为2种方法, 一种方法是基于现有微波通信技术, 采用在低频微波段调制方式, 通过倍频技术到太赫兹频段实现通信过程; 另一种是采用直接调制太赫兹源的方法, 在太赫兹源上直接加载调制信号, 实现太赫兹无线通信。利用这2种方式, 2006年日本NTT公司研发了基于0.12 THz频段的高清电视(High Definition TV, HDTV)信号的太赫兹无线传输通信^[8], 后来又进一步研究了基于全电子学的全固态太赫兹通信系统^[9], 实现了800 m传输距离通信, 极限情况下可达2 000 m。2011年中国工程物理研究院王成等人, 采用“肖特基二极管次谐波混频+中频信号16QAM高阶调制解调”技术路线, 在0.14 THz频段实现了10 Gbps无线通信, 传输距离达到500 m^[10]。2007年, 法国S Barbieri等人通过改变偏压直接调制太赫兹量子级联激光器(THz

收稿日期: 2014-04-09; 修回日期: 2014-05-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61131005); 教育部科学技术研究重大项目(313013); 教育部新世纪优秀人才资助计划(NCET-11-0068); 四川省杰出青年学术技术带头人计划资助(2011JQ0001); 高校博士点专项科研基金资助项目(20110185130002); 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目(CAEP THZ201207)

Quantum Cascade Laser, THz-QCL)在2.8 THz实现Gb/s传输速率^[11]。2008年底我国中科院上海微系统所,以曹俊诚教授为核心的THz研究团队在4.1 THz频率实现了基于THz-QCL和太赫兹量子阱探测器(THz Quantum Well Photodetector, THz-QWP)的无线通信演示,实现了图片和声音传输,并于2012年进一步实现了视频传输^[12]。

然而,这2种方式自身都存在明显弊端,基于微波倍频的通信方式,一方面采用上下变频和多种调制混频技术,大大增加了通信系统的复杂性,另一方面系统的通信速率仍由倍频前的低频频率决定,无法直接体现太赫兹波通信的超高带宽优势;基于调源的通信方式,对太赫兹源的性能要求非常苛刻,采用的源(如THz-QCL源等)往往需要在超低温下工作,也严重限制了这种方式的可用性。在这种情况下,本文从基于空间直接调制的方式研究了一种新型太赫兹无线通信系统,重点研究了基于石墨烯的太赫兹调制器,实现了330 GHz太赫兹无线通信系统设计及搭建。相较于前2种方式,研究空间性直接调制器及相应的太赫兹无线通信系统,对于深刻理解太赫兹波的内在特性及其与物质相互作用的物理规律具有重要的科研价值;同时,这种通信系统中太赫兹直接调制器可以独立于源和接收器,可任意组装、集成、替换,具有相当的灵活性。

1 基于石墨烯的光控太赫兹调制器

太赫兹调制器是基于空间调制的太赫兹无线通信系统的核心器件。本文在研究过程中选取具有超高载流子迁移率的石墨烯薄膜作为研究对象^[13],探索了半导体Si衬底上石墨烯薄膜在太赫兹波段的响应特性,并采用光控方式研究其在太赫兹波段的调制性能。高阻硅片为衬底的石墨烯薄膜(GOS),能在光激发下产生大量载流子,使太赫兹波对其透射大幅下降。基于此,本文重点研究了GOS的工作机理及其在太赫兹波调制方面的应用。

在研究过程中,本文选取的石墨烯均采用化学气相沉积法(Chemical Vapor Deposition, CVD)合成,并采用转移法将石墨烯转移到高阻硅片上形成石墨烯薄膜。对于高阻硅基片,本文在研究过程中也选取了不同电阻率的高阻硅片,并进行了一一对比测试,发现以电阻率为 $10\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 的高阻硅作为石墨烯的衬底时,在光激发下,太赫兹波透射的下降幅度最大,因而本文在下面的研究中,均采用电阻率为 $10\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 的高阻硅片作为石墨烯衬底。

针对研究的GOS结构太赫兹调制器,本文首先对其进行了拉曼光谱测试和扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)测试,以检测石墨烯薄膜的质量和完整性,其测试结果分别如图1和图2所示。

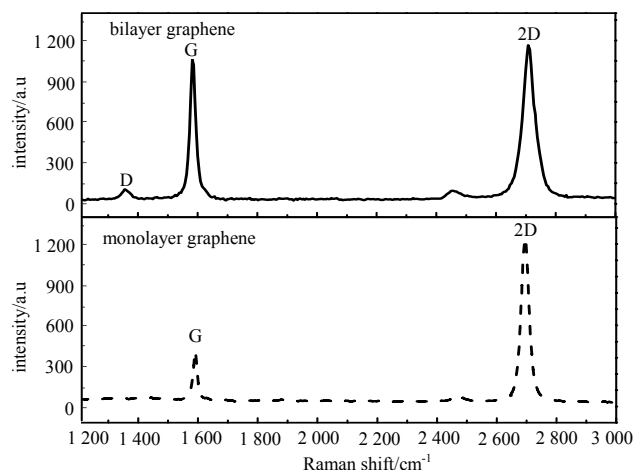


Fig.1 Raman spectra for monolayer and bilayer graphene on Si substrate
图1 Si衬底上的单层和双层石墨烯的拉曼光谱测试图

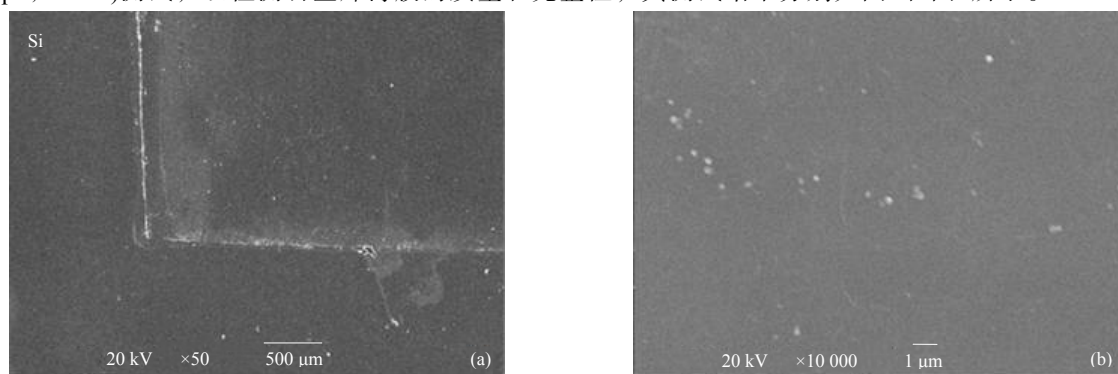


Fig.2 SEM photographs of graphene film(edge and intermediate)
图2 石墨烯薄膜 SEM 测试图(边缘与中间)

图1为测试激光波长为514 nm时Si衬底上单层和双层石墨烯薄膜的拉曼光谱。在单层石墨烯的拉曼谱中,并未发现D峰,说明不存在明显缺陷。在 $1\ 591\ \text{cm}^{-1}$ 和 $2\ 693\ \text{cm}^{-1}$ 位置处出现较强的G峰和2D峰,且它们的强度比值 I_{2D}/I_G 为3.05左右,证明石墨烯是单层的。而双层石墨烯的拉曼谱中,在 $1\ 355\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了D峰,在 $1\ 581\ \text{cm}^{-1}$ 和

2707 cm^{-1} 位置处存在G峰和2D峰,且它们的强度相差不大。2D峰对石墨烯层数很敏感,单层石墨烯的2D峰非常尖锐,而双层石墨烯的2D峰则相对较宽,这是因为双层石墨烯电子结构的改变,影响了双共振效应过程。因此采用不存在明显缺陷的单层石墨烯作为研究对象。

图2为Si衬底上石墨烯薄膜的SEM图。由于石墨烯对可见光有2.3%的吸收,因此在图2(a)中可以看到Si衬底和石墨烯薄膜之间有很明显的分界线:右上部显示的是石墨烯薄膜,其他部分是Si衬底。图2(b)所示是以高阻硅为衬底的石墨烯薄膜,薄膜成片完整,表面均匀。

利用透射式太赫兹时域光谱系统(Terahertz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS)测试了在激光作用前后GOS调制器的太赫兹透射特性。在测试中采用808 nm连续激光作为GOS调制器的泵浦源,激光光束直径约为2 mm,功率约为1.5 W,其测试结果如图3所示。

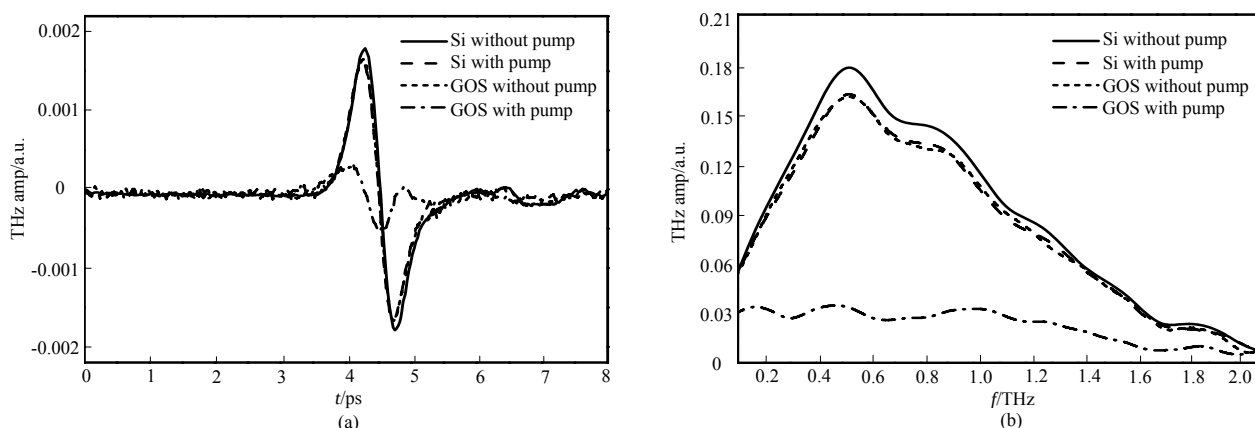


Fig.3 Time domain spectra and frequency domain spectra of Si and GOS by TDS system
图3 TDS系统测试Si和GOS在激光作用前后的时域谱图和频域谱图

图3(a)和图3(b)是利用TDS系统测试GOS结构在激光作用前后的时域谱图和频域谱图。从时域谱图中可以看出,以高阻硅为衬底的石墨烯薄膜,在激光作用下,使得太赫兹波的透射峰能量发生大幅度衰减。作为参考,高阻硅片本身在光激发下的太赫兹波透射峰能量也发生了下降,但是和GOS薄膜的大幅度下降相比要弱得多。因而可以得出结论,GOS对太赫兹波的透射强度大幅度衰减现象,不完全是由高阻硅片造成,与石墨烯薄膜也有很大关联,实际上是高阻硅片和石墨烯薄膜两者在激光作用下共同产生的结果。图3(b)是对应的频域谱图,经过计算,在激光作用下,GOS对太赫兹波的透射强度下降了近90%,且这个现象发生在很宽的频谱范围内,覆盖从200 GHz到2 THz的范围,此现象可以很好地应用于宽带太赫兹调制。

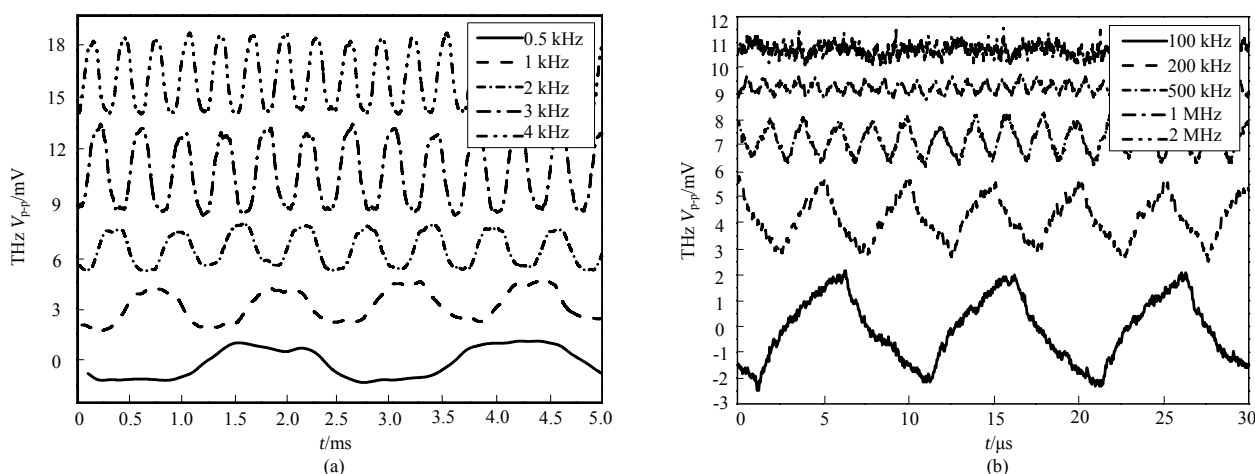


Fig.4 GOS modulation rate for 330 GHz
图4 GOS对330 GHz太赫兹波调制速率图

上面通过THz-TDS系统测试了GOS的静态性能,作为太赫兹调制器,需要测试其动态调制性能。为了测试GOS的太赫兹波调制速率,本文构建了330 GHz太赫兹波收发系统,发射端采用VDI商用330 GHz太赫兹连续波源,峰值功率约为1 mW,接收端采用肖特基二极管光探测器,这种探测器能够探测高达GHz快速变化的微弱光辐射信号。在测试过程中,同样采用808 nm连续激光器作为GOS泵浦源,保持激光输出功率500 mW不变。通过函数

信号发生器为激光器提供TTL(Transistor-Transistor Logic)方波驱动电压,控制照射在GOS表面的激光形成“通”和“断”。加载在激光器上方波调制信号的频率即是泵浦激光的频率。图4所示是在不同频率的泵浦激光作用下,由肖特基二极管探测器获得的太赫兹波强度信号。

从图4(a)和图4(b)中明显看出,测试中接收到的330 GHz连续太赫兹波幅值可以明显处于“0”和“1”的状态,说明GOS在调制泵浦激光的作用下,实现了对太赫兹波透射的“通”和“断”控制。在0 kHz~4 kHz的低速调制速率下,调制信号非常清晰;在高速调制速率下,调制后太赫兹波峰峰值会不断下降,当调制速率达到1 MHz时,太赫兹波的峰峰值下降到大约0.6 mV,此时仍可以探测到太赫兹波的“通”和“断”状态。继续提高调制速率达到2 MHz时,峰峰值强度仍旧存在约0.48 mV,但调制的波形变得不够均匀。这主要由2个方面因素造成,其一,随着加载到激光器的TTL调制信号频率不断提高,泵浦激光的功率在不断下降,在达到2 MHz时照射在GOS表面的激光功率已经大幅下降,这时光生载流子浓度变得很低,对太赫兹波的调制深度也就降低了。另一方面,在接收到的太赫兹峰峰值强度小于1 mV时,加入到测试的调制结果中的环境本身存在的背景噪声和示波器本身的干扰信号就会突显出来,造成测试信号出现毛糙,不再均匀。

以上测试结果表明,以高阻硅为衬底的石墨烯薄膜GOS,在外加激光作用下,可以作为太赫兹波强度调制器。之所以出现这个现象,主要在于GOS在光激发下产生大量光生载流子,包括高阻硅片中的大量自由载流子以及石墨烯薄膜中少量的电子-空穴对。由于石墨烯和硅片存在电子浓度梯度,自由载流子将从硅片扩散到石墨烯薄膜中,直到动态平衡。高阻硅中的电子迁移率约为 $1\,350\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{S}^{-1}$,而石墨烯中电子迁移率超过 $15\,000\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{S}^{-1}$,因此,扩散到石墨烯薄膜中的自由电子,和在硅片中相比,将获得非常大的电子迁移率。由电导率 σ 公式 $\sigma=nq\mu$,式中 n 为电子浓度, q 为电子电荷量, μ 为电子迁移率,可知高阻硅片及石墨烯结合层中将出现非常高的电导率层,进而导致了GOS对太赫兹波的衰减。这也很好解释与单独高阻硅片相比,GOS对太赫兹波调制幅度更为显著。

GOS对太赫兹波的作用可分为透射、反射和吸收3部分,为了进一步分析GOS对太赫兹波的调制作用机理,本文借助330 GHz太赫兹波收发系统,测试了泵浦激光功率变化情况下,GOS对太赫兹波的透射和反射特性,并根据测试结果计算出吸收变化,得到的GOS对太赫兹波能量的透射、反射和吸收变化情况,如图5(a)所示。由图中可以看出,随着泵浦激光功率增大,GOS对330 GHz太赫兹波的透射和反射率均不断下降,吸收率呈现明显上升,说明GOS对太赫兹波的调制作用是由GOS对太赫兹波的吸收增强效应造成的。

这一点采用B Sensale-Rodriguez等人的透射/反射计算模型^[14],对比实际测试可以很好地予以验证。假定GOS在泵浦激光作用下,石墨烯层的电导率变为 σ_s ,随着激光功率增大,激发出的载流子浓度越大, σ_s 也就越大。不同电导率 σ_s 下,透射率 T 和反射率 R 理论计算公式如下:

$$T = \frac{2n_{\text{air}}}{n_{\text{air}} + n_{\text{si}} + Z_0\sigma_s} \quad (1)$$

$$R = \frac{n_{\text{air}} - n_{\text{si}} - Z_0\sigma_s}{n_{\text{air}} + n_{\text{si}} + Z_0\sigma_s} \quad (2)$$

式中: $n_{\text{air}}=1$ 为真空折射率; $n_{\text{si}}=3.42$ 为硅片中太赫兹波的折射率; $Z_0=363.732\,5\,\Omega$ 为真空阻抗。

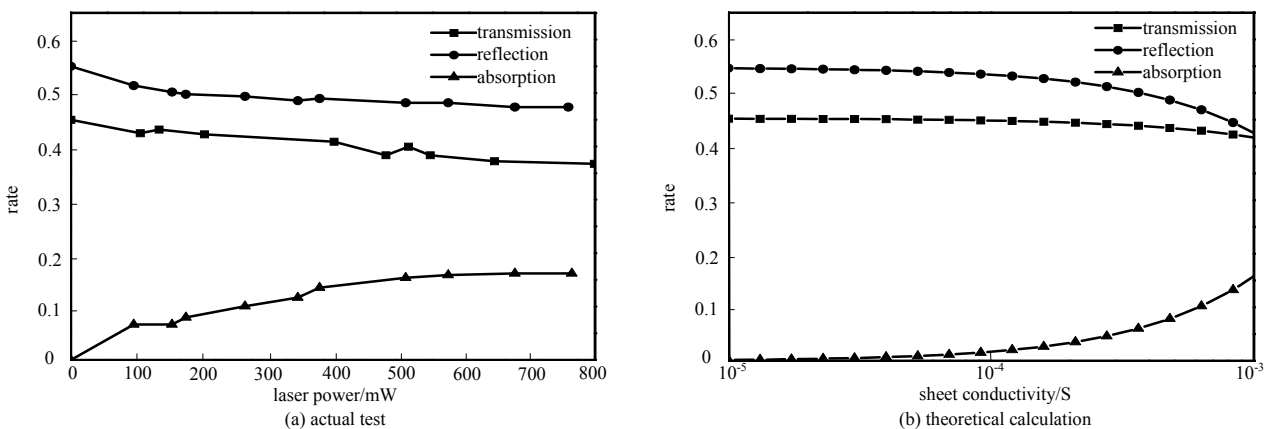


Fig.5 GOS transmission, reflection and absorption changes for 330 GHz

图 5 GOS 对 330 GHz 太赫兹波透射、反射和吸收变化情况

根据式(1)和(2)计算得到的GOS对太赫兹波的透射率、反射率和吸收率与石墨烯电导率 σ_s 理论关系如图5(b)所示。理论计算表明随石墨烯电导率 σ_s 增大,GOS对太赫兹波的反射率和吸收率都将不断下降,吸收率不断上

升, 这 and 实际测试结果相吻合, 验证了GOS对太赫兹波的调制为吸收增强调制机理。

2 基于 GOS 的 330 GHz 太赫兹无线通信系统

前面具体分析了GOS对太赫兹波的调制作用,从中可以看出以高阻硅片为衬底的石墨烯薄膜可以对太赫兹波进行很好的强度调制作用。在此基础上,进行了330 GHz太赫兹无线通信系统的初步构建,以此来测试GOS太赫兹调制器的实际功能。采用2ASK调制解调方式,实现了1 Mbps数据传输速率。

本文构建的330 GHz太赫兹无线通信系统,包括太赫兹波发射端、太赫兹波调制端和太赫兹波接收端。发射端包括太赫兹波信号发生器,用来产生连续太赫兹波信号;调制端包括数据采集卡、连续激光器及GOS太赫兹调制器,将文件进行2ASK编码后,通过数据采集卡转换为对应的TTL电压基带信号,并加载到连续激光器得到调制的激光;随后,将调制的泵浦激光照射到GOS太赫兹调制器,对太赫兹波进行调制,完成基带信号的加载;接收端包括太赫兹检波器、低噪声电压信号放大器和数据采集卡,检波器接收载波的太赫兹信号并进行解调,之后通过低噪声电压信号放大器进行信号放大,再次通过数据采集卡进行数字采集,解码后输出文件,具体系统结构如图6所示。

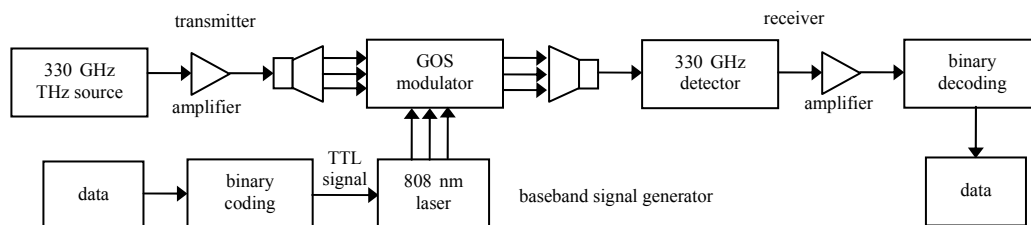


Fig.6 Architecture of GOS-based 330 GHz wireless communication system

图 6 基于 GOS 的 330 GHz 太赫兹无线通信系统结构图

在通信系统中, 信号编解码均为二进制方式, 采用通过LabVIEW软件处理及NI6251数据采集卡实现。主要步骤为: a) 对原始数据文件进行分割, 采用二进制读取, 进行二进制编码; b) 基于编码文件, 加入同步识别位, 生成波形文件, 并经由数据采集卡读取, 转换为TTL电平基带信号; c) 接收信号经过检波放大后, 经数据采集卡采样产生采样文件, 解调程序进行读入, 识别同步识别位, 输出到解调文件中; d) 对解调文件进行二进制译码, 生成数据文件。

由于系统传输中将数据文件采用二进制码传输,因而构建的330 GHz无线通信系统基本可以用于计算机上各类文件传输。在传输实验中,本文进行了声音、图像和视频的传输,在1 Mbps传输速率下,实验结果无比特错误发生,成功验证了GOS可以作为高频段太赫兹波强度调制器,构建高频段太赫兹无线通信系统。

3 结论

本文研究表明, GOS能在激光作用下使太赫兹波透射大幅下降, 采用GOS作为一种新型全光学太赫兹调制器, 调制速率可达到1 MHz, 调制深度达50%以上, 同时工作频带覆盖0.2 THz~2 THz频段。在此基础上, 构建的330 GHz太赫兹无线通信系统, 实现了1 Mbps的通信速率, 为今后太赫兹无线通信系统设计研究, 尤其是300 GHz以上太赫兹通信系统构建提供了新的研究思路和方向。

参考文献:

- [1] Cherry S. Edholm's law of bandwidth[J]. IEEE Spectrum, 2004,41(7):58–60.
- [2] Foschini G J,Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998,6(3):311–335.
- [3] Paulraj A J,Gore D A,Nabar R U,et al. An overview of MIMO communications—a key to gigabit wireless[J]. Proceedings of the IEEE, 2004,92(2):198–218.
- [4] Miles R E,ZHANG X C,Eisele H,et al. Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects[M]. Berlin Germany:Springer Netherlands, 2007:325–338.
- [5] Piesiewicz R,Kleine-Ostmann T,Krumbholz N,et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications: Concepts and perspectives[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007,49(6):24–39.

- [6] Federici J, Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11):111101–111101–22.
- [7] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A review on terahertz communications research[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, 32(2):143–171.
- [8] Hirata A, Kosugi T, Takahashi H, et al. 120-GHz-band millimeter-wave photonic wireless link for 10-Gb/s data transmission[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(5):1937–1944.
- [9] Hirata A, Yamaguchi R, Kosugi T, et al. 10-Gbit/s wireless link using InP HEMT MMICs for generating 120-GHz-band millimeter-wave signal[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(5):1102–1109.
- [10] 王成, 刘杰, 吴尚昀, 等. 0.14 THz 10 Gbps 无线通信系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(3):265–269. (WANG Cheng, LIU Jie, WU Shang-yun, et al. 0.14 THz 10 Gbps wireless communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(3):265–269.)
- [11] Barbieri S, Maineult W, Dhillon S S, et al. 13 GHz direct modulation of terahertz quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(14):143510–143510–3.
- [12] 谭智勇, 陈镇, 韩英军, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的无线信号传输的实现[J]. 物理学报, 2012, 61(9): 98701–98701–5. (TAN Zhi-Yong, CHEN Zhen, HAN Ying-Jun, et al. Experimental realization of wireless transmission based on terahertz quantum cascade laser[J]. Chinese Physics, 2012, 61(9): 98701–98701–5.)
- [13] Weis P, Garcia-Pomar J L, Höh M, et al. Spectrally Wide-Band Terahertz Wave Modulator Based on Optically Tuned Graphene[J]. ACS Nano, 2012, 6(10):9118–9124.
- [14] Sensale-Rodriguez B, YAN R, Kelly M M, et al. Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions[J]. Nature Communications, 2012, 3:780.

作者简介:



刘海涛(1988–), 男, 江苏省连云港市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹波调制技术、太赫兹无线通信技术等 .email: liuht88@sina.cn.

孙丹丹(1987–), 女, 浙江省宁波市人, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹波调制技术及相关功能器件.

田 伟(1988–), 男, 银川市人, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹波调制技术及相关功能器件.

文岐业(1976–), 男, 广西省桂林市人, 教授, 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 .email: qywen@uestc.edu.cn.

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.

陈 智(1974–), 男, 四川省南充市人, 教授, 主要研究方向为无线与移动通信、无线通信网络和通信抗干扰技术.

张怀武(1959–), 男, 陕西省汉中市人, “长江学者计划”特聘教授, 自然科学基金杰出青年基金获得者, 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.