

太赫兹通信技术研究进展*

顾立 谭智勇 曹俊诚[†]

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室 上海 200050)

2013-07-28收到

[†] email: jccao@mail.sim.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20131003

Terahertz communication technology

GU Li TAN Zhi-Yong CAO Jun-Cheng[†]

(Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, CAS, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

摘要 对未被分配的空闲频谱资源的需求增长, 将不可避免地使无线通信系统的工作频率向更高频率的太赫兹(THz)频段发展。大数据的瞬时传输将采用更高的载波频率, 以满足高传输速率的需求。大量的研究表明, THz技术在通信领域的应用与当今比较成熟的微波通信和光纤通信相比, 具有更多的优点, 比如说, 传输速率高, 方向性好, 安全性高, 散射小, 以及穿透性好等。文章总结了THz通信的特点及其适用领域, 综述了近几年国际上THz通信研究最新进展, 给出了未来THz通信系统可能的发展趋势。

关键词 太赫兹通信, 太赫兹发射源, 太赫兹调制器, 太赫兹探测器, 太赫兹无线通信系统

Abstract The increasing demand on unoccupied and unregulated spectral band resources will inevitably lead to the extension of wireless communication operation towards the higher terahertz (THz) frequency range. Higher carrier frequencies will allow for instantaneous transmission of huge amounts of data to satisfy the demand for high transmission rates. A large number of studies have indicated that, compared to optical fiber and microwave communications, THz communication has more advantages, such as high transmission rate, better directionality, high security, low scattering, and good penetrability. We review the progress in THz communication technology over the past few years, as well as possible future trends.

Keywords THz communication, THz emission source, THz modulator, THz detector, THz wireless communication system

1 引言

早在1895年, 马可尼首次从英国怀特岛到30 km之外的一条拖船之间成功进行了无线传输, 现代意义下的无线通信从此诞生, 但是直到上世纪80年代, 无线通信系统才被用来传输声音或者简单的文本信息。而互联网的各种多媒体业务(提供图像、声音和文字的业务)在上世纪90年

代才真正发展起来, 这些业务的数据都是通过有线传输。而近几年无线通信领域中移动设备和多媒体业务的快速发展, 让我们看到了人们使用多

*国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA010205)、国家自然科学基金(批准号: 61131006, 61021064)资助项目, 国家重大科学仪器设备开发专项(资助号: 2011YQ150021), 02国家科技重大专项(批准号: 2011ZX02707)、中国科学院重要方向项目(批准号: YYYJ-1123-1)、中国科学院创新团队国际合作伙伴计划: “高迁移率材料工程”创新团队项目, 上海市基础研究重点基金(批准号: 10JC1417000)以及上海市自然科学基金(批准号: 11ZR1444200)资助项目

媒体业务方式的改变。到了今天，人们越来越依赖于移动设备和无线网络进行信息的传递。无线传输速率在过去近30年里平均每18个月就增加2倍(从1984年无线电波不到1 kb/s的传输速率到2013年无线局域网100 Mb/s的传输速率)，指数增长的无线传输速率在未来十年内会达到十几 Gb/s^[1]。由于载波频率越高，带宽才会越宽，传输速率才能越高，虽然频率分配计划已经高达275 GHz，频谱利用率也能进一步提高，但是我们仍难以找到足够宽的空闲带宽^[2]。无线局域网与短距离无线连接的蓝牙技术的载波频率只有几 GHz，使得无线带宽受到限制^[3]；室内通信超宽带技术只能将传输速率提高到标准距离下的110—200 Mb/s，减小距离后也只能达到500 Mb/s^[4]；采用红外光进行高速数据传输也不是最佳选择，这是因为非相干接收器的低灵敏度、高漫反射损耗、高背景光噪声和功率限制造成了传输速率仅有几百 Mb/s^[5]。而介于微波与红外光之间的太赫兹 (THz, 1 THz = 10^{12} Hz) 频段一般是指频率为0.3 THz—30 THz(波长为1 mm—10 μm)的辐射波，目前还未被应用。由于THz频段存在大气透射窗，因此0.3 THz以上的载波频率能够用于采用高比特率传输技术的通信系统^[6]。Koch^[3]在

2007年预测基于THz波的通信系统将在2017—2023年取代无线局域网系统。

目前，THz通信领域的研究与应用受到世界各国重视。很多国家都提出了THz通信研究计划。当前国外的一些研究小组对THz通信做了大量研究和实验，报道了一些THz通信实验室演示系统，取得了一定的经验。主要的THz通信研究计划有美国航空航天局(NASA)、美国空军科学研究办公室实验室(AFOSR)和美国空军研究实验室(AFRL)的传感器研究部针对空军成像、通信和预警用的紧凑创新的SiGe基THz源和探测器的研究计划。美国空军的另一个应用研究计划为安全短距离大气通信。此外，研究计划中还有欧盟第五框架计划资助的WANTED工程(Wireless Area Networking of Terahertz Emitters and Detectors) 和 NanoTera 工程(Ballistic Nanodevices For Terahertz Data Processing)

本文首先介绍高速无线通信系统的需求和可能的应用，同时讨论THz通信的特点及适用范围。第二部分介绍几种典型的THz通信发射子系统与接收子系统。第三部分介绍THz发射源、调制器及探测器等THz通信系统关键器件的最新进展。第四部分介绍一些THz通信研究机构提出的比较有代表性的THz通信演示系统方案。最后分析THz通信领域今后的发展趋势。

2 高速无线通信的需求与可能的应用

图1为无线通信技术中载波频率与传输速率的关系。从图中可看出，传输速率随着载波频率增加而增加。通常，在幅移键控(ASK)调制方式下，传输速率是载波频率的10%—20%。如果传输速率达到10 Gbit/s—100 Gbit/s需要用到100—500 GHz的载波频率。

目前未压缩的高清电视数据通过DVD或者摄像机传输给电视设备的比特

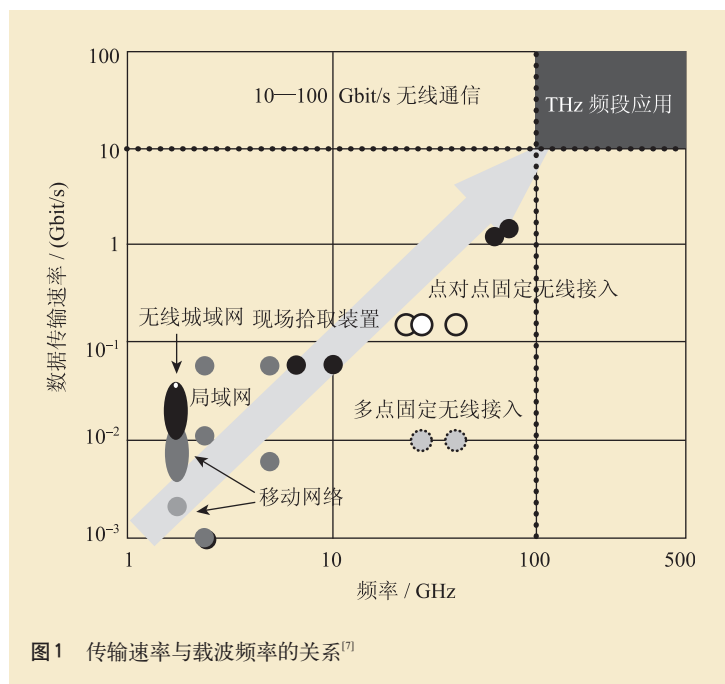


图1 传输速率与载波频率的关系^[7]



率已经超过 1.5 Gbit/s 了。一些消费电子产品的制造商也把 Gbit 无线接口引入到他们的最新产品中了。未来的无线技术需要 10 Gbit/s 以上的传输速率。还有一种高速无线链路的标准，通过移动终端与储存设备，来实现巨大数据量的近距离传输。其包含几种技术，分别是“闪传支持(transfer jet)”^[8]技术和采用红外传输的“千兆红外技术(GigaIR)” (1 Gbit/s)^[9]。

图2展示了另一类应用情景，即通过固体存储器媒质快速集中处理太比特的数据量，例如安全数字(SD)存储器和固态硬盘存储器。这一类应用连同存储器内部存取速度提升方面的进展，使我们能够利用高速无线链路实现个人移动终端与个人电脑之间以及个人移动终端与云服务器之间的大量数据的瞬时传输。

由以上发展趋势可以看出，高速 THz 无线通信技术能消除网络接入速度的瓶颈，如光纤网络无线宽带接入，高速有线局域网的无线扩展，低速无线局域网与高速光纤网络的无线桥接，宽带室内微微蜂窝网络等。

3 THz 通信的特点及适用范围

THz 电磁波的光子能量约为可见光的光子能量的四十分之一，因而利用 THz 波做信息载体要比用可见光或近中红外光能量效率高得多。与微波技术相比，THz 波可以探测更小的目标和实现更精确的定位，具有更高的分辨率和更强的保密性；而与红外和激光技术相比，THz 波具有穿透沙尘烟雾的能力，可以实现全天候工作，因而 THz 技术有望在军事装备和国家安全等方面发挥巨大作用。

THz 通信有着很多特点，这些特点包括：

(1)大气不透明。由于大气中的水汽对 THz 波有强烈的吸收作用，因此 THz 对大气表现的不透明性，这就使得 THz 通信不适合地面远程通信。但在通信双方一定距离以外的区域，THz 通信信号有一个很高的衰减，使得探测通信信号非常难，因此它适合地面短程安全通信。

(2)带宽宽。THz 频段在 0.3 THz—10 THz，因

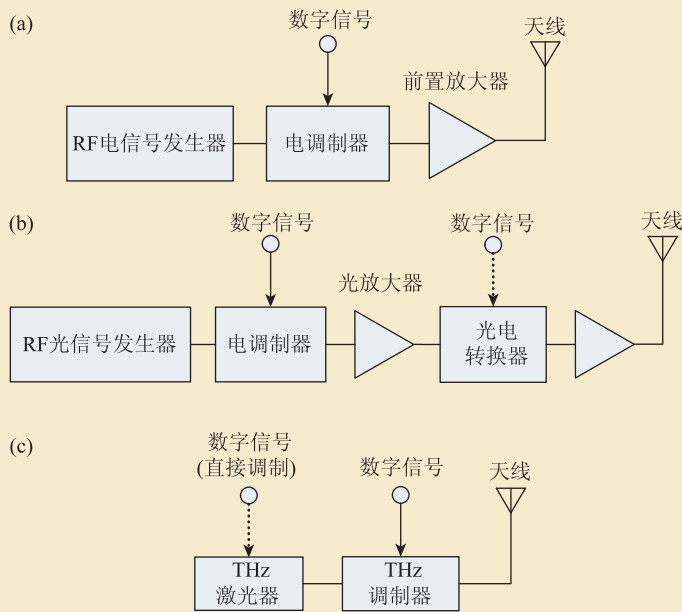


图3 THz发射子系统结构图 (a)全电子器件系统；(b)光电子器件系统；(c)THz激光器系统

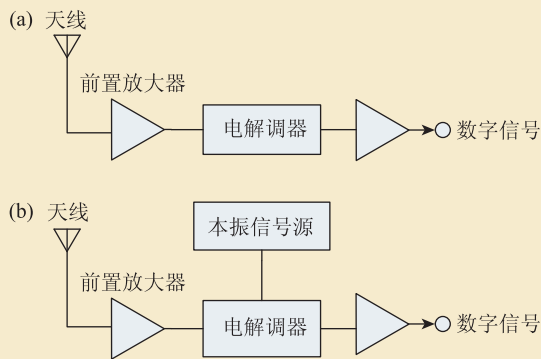


图4 THz接收子系统结构图 (a)直接探测系统；(b)相干探测系统

此可以划分为更多的通信频段。而且THz频段大约是长波、中波、短波、微波(30 GHz)总的带宽的1000倍。这就决定了THz通信是高宽带通信,可以满足当前人们对通信速率不断增加的要求。如果事先不知通信双方所使用的通信频段,要想在如此高的带宽内正确捕捉到通信双方使用的频段,其概率是非常小的,因此THz通信也是安全的。

(3)天线小,方向性好。由于THz波的频率比微波更高,波长很短,可以制成方向性很强,尺寸又小的天线,可以大大减小发射功率和减轻相

互之间的干扰。

(4)THz散射小,对浮质和云层可穿透性高。这主要是由于THz波的波长小决定的。国际通讯联盟已指定200 GHz的频段为下一代卫星间通信之用。进一步的发展必定进入300 GHz以上的范围。THz通信适合于卫星间的星际通信和同温层空对空通信^[13]。所谓同温层是指从地面10公里至50公里高度的大气层,同温层内空气多作水平运动,气流平稳,能见度好,适于监视和侦察设备飞行。

从上面介绍的THz波的特点来看,THz通信的适用领域可为:(1)卫星间星际通信;(2)同温层内空对空通信;(3)短程地面无线局域网;(4)短程安全大气通信。

4 THz通信系统组成结构

如图3所示,目前有三种典型的THz发射子系统方案。第一种方案是基于电子器件的THz发射子系统,它由射频信号发生器、调制器和后置放大器组成。通常THz信号为多倍放大耿氏振荡器信号,或由30—100 GHz的微波/毫米波发生器合成得到。而集成电路振荡器作为一种新THz发射源也是目前的研究热点,如共振隧道二极管(resonant tunneling diode, RTD)^[10]。

管(resonant tunneling diode, RTD)^[10]。

第二种方案是利用光电子学器件来实现THz信号的产生和调制。两个红外激光器产生的两束光信号,利用光学外差法并通过单行载流子光电二极管(uni-traveling-carrier photo-detector, UTC-PD)转换为THz信号。该THz发射子系统的载波频率在1 THz以下,主要基于1.55 μm远距离通信平台,如光纤、铟涂料光纤放大器和半导体激光放大器。

第三种方案是基于半导体激光器的THz发射子系统,如量子级联激光器(quantum cascade

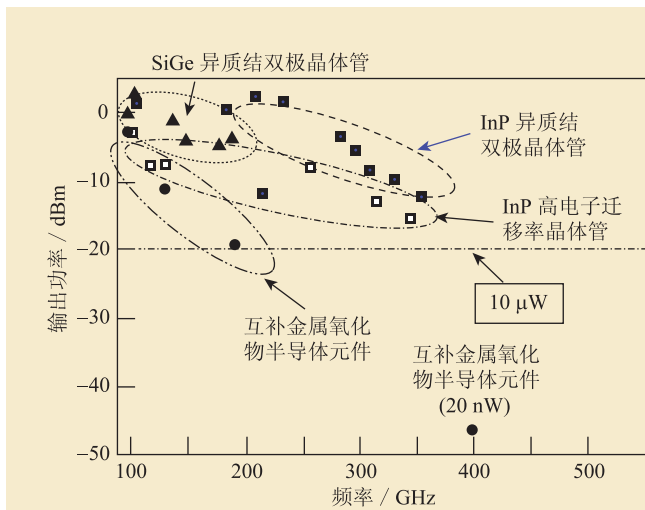
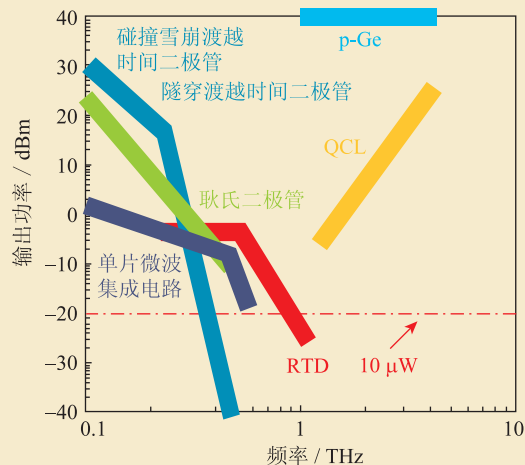


图5 几种半导体 THz 源的输出功率对比图^[12, 13]



laser, QCL)。THz QCL 可以产生 1 THz 以上的 THz 信号。通过外调制器, QCL 可实现调制频率在 10 GHz 以上的直接调制^[11]。THz 外调制器主要有二维电子气半导体调制器和基于超材料的调制器。

如图 4 所示, THz 接收子系统有两种典型方案, 两种方案都能利用电子器件或量子阱探测器等光电子器件搭建系统平台。直接探测(图 4(a))系统结构简单, 能非常容易地通过 1—10 THz 频率的载波, 而高灵敏相干探测(图 4(b))系统结构较复杂。

与直接探测相比, 相干探测的优点有: 可以探测频率调制和相位调制; 主要噪声由本振产生, 而不是由背景噪声辐射产生; 中频转换能产生增益, 可以忽略热噪声和“产生—复合噪声”(“产生—复合噪声”是由半导体中载流子产生与复合的随机性而引起载流子浓度的起伏而导致的); 转换增益与 W_{Lo}/W_s 成比例(W_{Lo} 为本振功率, W_s 为输入信号功率)。与直接式探测器相比, 可探测到非常微弱的信号。

5 THz 通信系统的关键器件

5.1 太赫兹信号发射源

图 5 总结了半导体 THz 源的发展现状。目前

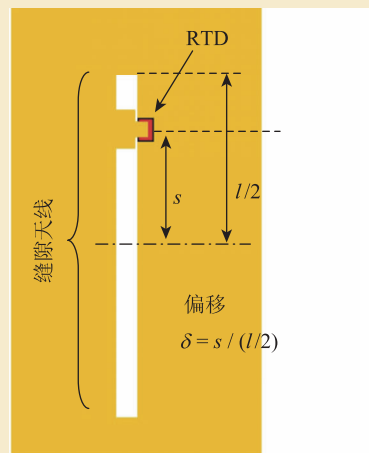


图6 偏移缝隙天线结构的 RTD^[15]

的器件制造技术都能够实现 $10 \mu\text{W}$ 的输出功率, 这一输出功率是实际应用的下限值。

共振隧道二极管(RTD)是一种依靠量子共振隧穿效应工作的新型纳米器件。器件结构是通过分子束外延技术生长出的双势垒 AlAs/GaInAs/AlAs 量子阱结构, 在这结构上外加偏置电压, 会出现负微分电阻(negative differential conductivity, NDC)效应。利用 NDC 效应可以产生 THz 波段的振荡频率。目前 RTD 最高振荡频率能达到 1.31 THz, 但其功率只有 $10 \mu\text{W}$ ^[14]。采用图 6 所示的偏移缝隙天线结构, 能提高发射功率, 采用该结构的 RTD 最大发射功率为 $420 \mu\text{W}$, 振荡频率为 550 GHz^[15]。

单行载流子光电二极管(UTC-PD)是基于光电子学器件的 THz 发射子系统的核心器件^[12]。UTC-PD有源区由两层组成:一层是中性的(非耗尽)窄带隙光吸收层(p型 InGaAs),另一层是无掺杂或少量n型掺杂的(耗尽)宽带隙载流子吸收层(InP)。电子空穴对仅当波长为 1.55 μm 的入射光透过滤载流子吸收层时才由吸收层产生,即产生光电流。在单行载流子结构中,只有电子是激发态的载流子。

图7为UTC-PD与类UTC的光电二极管各自的工作频率与输出功率的关系图。UTC-PD输出功率的下降与 f^{-4} 成比例。目前高功率光电二极管的散热处理是阻碍其使用的最大问题,UTC-PD在未达饱和工作条件时由于散热问题导致烧片。

THz QCL(量子级联激光器)是基于半导体激光器的 THz 发射子系统的核心器件^[16]。与传统激光器相比,THz QCL主要有两个特点:首先,它是一种子带间的单极器件,它只利用了电子在不同子带间的跃迁来辐射光子,而不考虑空穴的输运;其次,它是一个级联的结构,由几十甚至一

百多个重复的周期组成,电子在每个周期内重复释放光子,这样就提高了器件的输出功率。

THz QCL由于其能量转换效率高,体积小,轻便和易集成等优点,成为了当前的研究重点之一。从2002年第一个 THz QCL 成功制备开始,器件的工作温度、输出功率等性能已经得到了非常大的改进和提高^[16]。目前,基于共振声子散射的器件具有最好的温度性能,而从束缚态向连续态跃迁的设计具有最小的阈值电流,这两种结构也成为 THz QCL 有源区结构设计的主要方向。THz QCL 器件研制的最新进展如下:脉冲模式下的最高工作温度为 199.5 K, 激射频点为 3.22 THz^[17];连续模式下的最高工作温度为 117 K, 激射频点为 3 THz^[18];脉冲模式下最大峰值辐射功率为 248 mW, 连续模式下最大峰值功率为 138 mW^[19]。从理论上讲,中红外 QCL 本征带宽能达到 100 GHz, 对于 THz QCL, 其电子寿命与中红外 QCL 一样都为皮秒量级。因此, THz QCL 的本征调制带宽有望达到和中红外 QCL 类似的水平^[20]。

5.2 外置THz调制器

近年来,人们已经实现了多种 THz 光调制器。目前大部分 THz 调制器的调制频率都在 1 THz 以下, H. T. Chen 等提出了一种基于超材料的 THz 调制器,图 8(a)为器件结构示意图^[21]。利用微加工技术将金制开口谐振环(split ring resonator, SRR)阵列刻在 GaAs 衬底上,金属与半导体衬底的接触表面构成一个等效肖特基二极管,在衬底与微带材料之间加载一定电压,衬底与 SRR 可等效于 LCR 共振电路模型(图 8(b)),改变外置偏压,就可实现对共振强度的调谐,从而控制 THz 波的传输。在反向偏压为 16 V 时, 0.72 THz 频点处的透射强度下降了

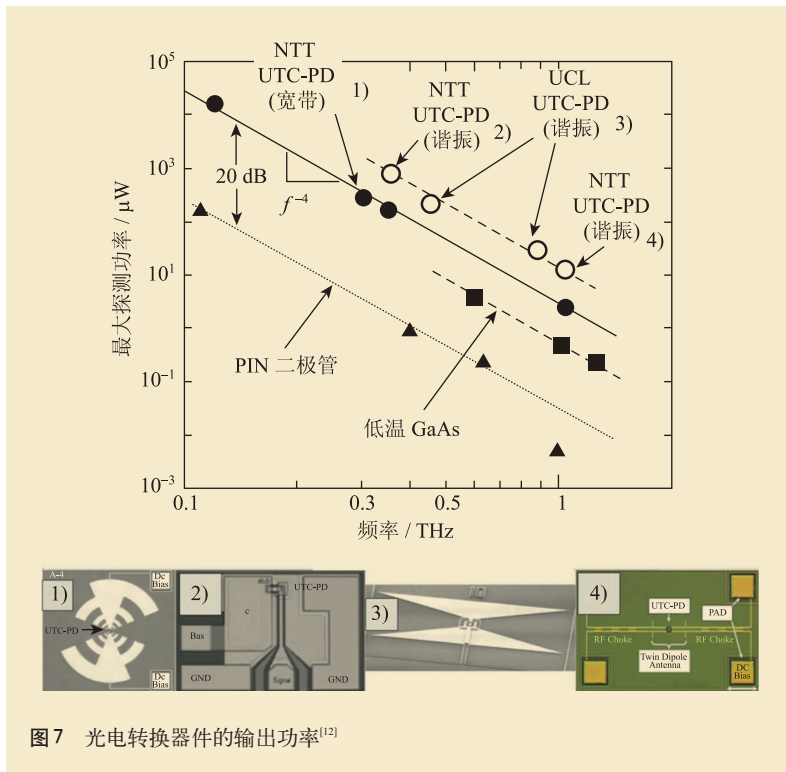


图7 光电转换器件的输出功率^[12]

50%。2009年，他们在上述结果基础上，提出了一种线性电控超材料THz相位调制器^[22]。外加16 V偏压时，在0.81 THz频点处，材料透射系数由无外加偏压时的0.56下降到0.25，透射振幅下降了50%，在0.89 THz频点处，可实现 $\pi/6$ 的相移。其透射振幅与透射相位都与外加偏压呈线性关系，可利用该结构制造电压调控的THz相位调制器。

Kleine-Ostmann等制作了一个室温工作的THz外调制器，该器件基于二维电子气(2D electron gas, 2DEG)消耗的传输变化^[23]。2DEG结构最初由Allen等研制出来^[24]，用于高电子迁移率晶体管。该器件采用5 nm厚的铬合金栅极来控制二维电子气底部的电子密度。通过-10 V的栅源极电压，透射过器件的0.1—2 THz频段的信号幅度可以增加3%^[23]。

基于肖特基二极管与平面超材料的结构由于有较大的电容与串联电阻，因此调制速率较低。W. J. Padilla等首次报道了一种光控THz超材料器件，该器件同样是基于SRR阵列的结构^[25]。通过光激励在GaAs衬底上激发光生载流子，调控光泵功率来调节SRR开口处的载流子浓度，实现开口电容的调谐，从而调控THz波传输。0.56 THz信号透射过器件的透射强度下降到0.15。

在外场作用下，石墨烯表现出较高的电致电阻和磁致电阻，可以用来改变太赫兹光在石墨烯器件中的透射率或反射率，因此，近几年基于石墨烯的THz调制器也是研究的热点之一。Sensale Rodriguez等报道了一种电控石墨烯THz调制器^[26]，如图9所示，其原理是通过控制带内跃迁来改变石墨烯导电性。带内跃迁由调制器的上接触与环形背栅金属之间的电压控制。570—630 GHz的信号通过调制器的调制深度为16%。

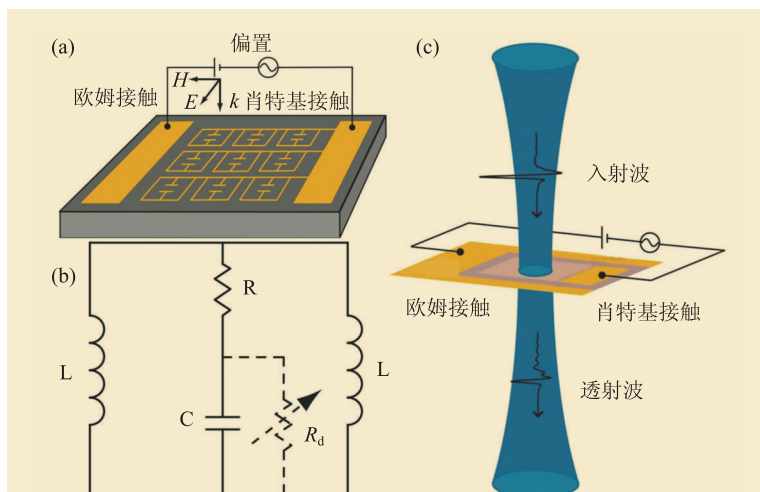


图8 (a)器件结构示意图(k 是电磁波在介质中的传播矢量)；(b) LCR共振电路模型；(c) THz波传输示意图^[21]

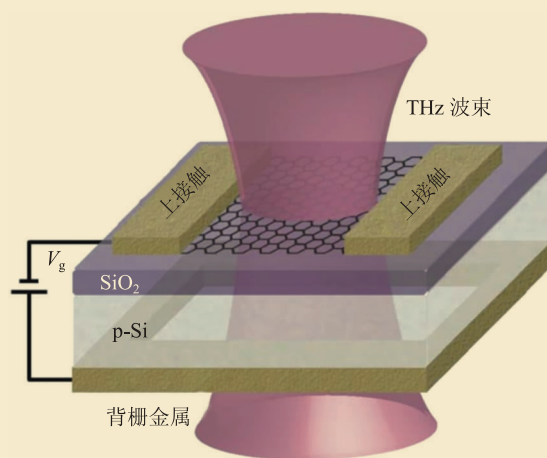


图9 石墨烯THz调制器直观图^[26]

5.3 太赫兹通信用探测器

探测器技术的发展是THz技术研究的核心，同时探测器也是THz接收子系统的关键器件。目前运用得比较广泛的主要有肖特基势垒二极管(Schottky barrier diode, SBD)。如图10所示，这种探测器的噪声温度本质上已经达到了一个极限：频率低于3 THz范围内为 $50 hv/k$ (k 为玻尔兹曼常数)^[27]。SBD既可用于工作在4—300 K温度范围内的直接式探测器，也可用作外差式接收单元混频器的非线性元件^[28]。

其他种类的探测器在 THz 波段同样取得了较大进展，主要有：超导—绝缘体—超导(superconducting—insulator—superconducting, SIS)隧穿结，超导热电子辐射热测量计(hot electron bolometer, HEB)和 THz 量子阱探测器(quantum-well photodetectors, QWP)。SIS 结基于准粒子光辅助隧穿绝缘层的原理工作，探测频率范围约为 0.3—0.7 THz^[29]。虽然 SIS 结的灵敏度高，本征噪声较低，但是其工作温度低于 1K，典型值为 300 mK。

和 SBD 以及 SIS 混频器不同，HEB 混频器是一种利用声子、电子散射冷却机制发展起来的热探测器。HEB 混频器的噪声温度在 2.5 THz 以下十分符合 $10 hv/k$ 曲线^[27]。与 SBD 相比，HEB 混频器所需要的 LO 功率低了 3 到 4 个数量级。关于高温超导(high temperature superconductor, HTSC) HEBs，目前还没有很多关于这类接收器的文献。由于其复杂的构造，目前还未发展出成熟的技术可以将其在很高临界温度下做在某个很薄的层上。HTSC 属于声子冷却型，电子扩散机制可忽略^[30]，电子—声子弛豫时间很短(对 YBaCuO，约为 1.1 ps^[31])。实际上，HTSC HEB 混频器达不到低温超导 HEBs 的灵敏度。

THz 量子阱探测器(QWP)是量子阱红外光电探测器在 THz 波段推广的一种新型有潜力的探测

器。其工作原理是基于带内光致激发，将导带阱内的束缚态电子激发到连续态^[32]。一般的 THz QWP 采用 GaAs/AlGaAs 材料体系^[33]，器件生长在半绝缘 GaAs 衬底上，自下而上分别为下电极层、多量子阱层和上电极层，如图 11 所示，衬底制作成 45° 斜面，THz 波垂直斜面入射，在衬底中经多次反射进入多量子阱层。其中上下电极层为 n 型掺杂 GaAs，多量子阱层由数十个周期的 AlGaAs 势垒和 n 型掺杂 GaAs 势阱组成。与其他种类的 THz 探测器相比，THz QWP 是一种窄带探测器，它具有较强的光谱分辨本领，在某些应用中不需要滤光片；对于中红外量子阱探测器，实验已经证明，其响应速率高达几十 GHz^[34]，与其工作原理相同的 THz QWP 在高速 THz 波探测方面，也具有相当的优势，这是许多其他 THz 探测器所不具备的；依靠成熟稳定的半导体工艺，可制备性能稳定的大规模阵列 THz 探测器，THz QWP 探测阵列可用于实时和高速 THz 成像。

6 THz 无线通信演示系统的最新进展

目前报道的大部分 THz 无线通信系统的频带都在 300 GHz 左右，而采用 RTD 与 THz QCL 作为发射源的 THz 无线通信系统的载波频率高于 500 GHz。

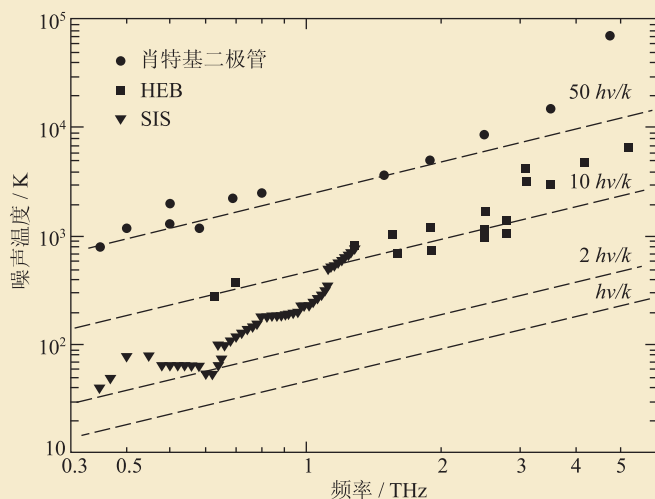


图 10 SBD 混频器，SIS 混频器和 HEB 混频器工作在 THz 频段时的噪声温度^[27]

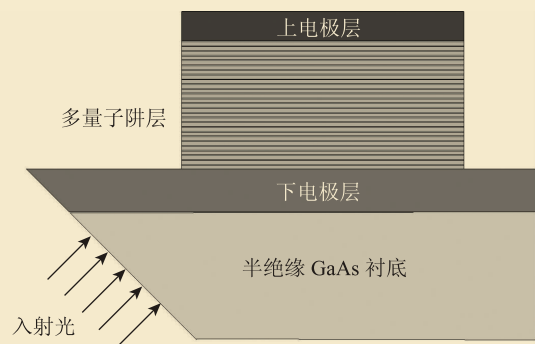


图 11 THz QWP 器件结构示意图

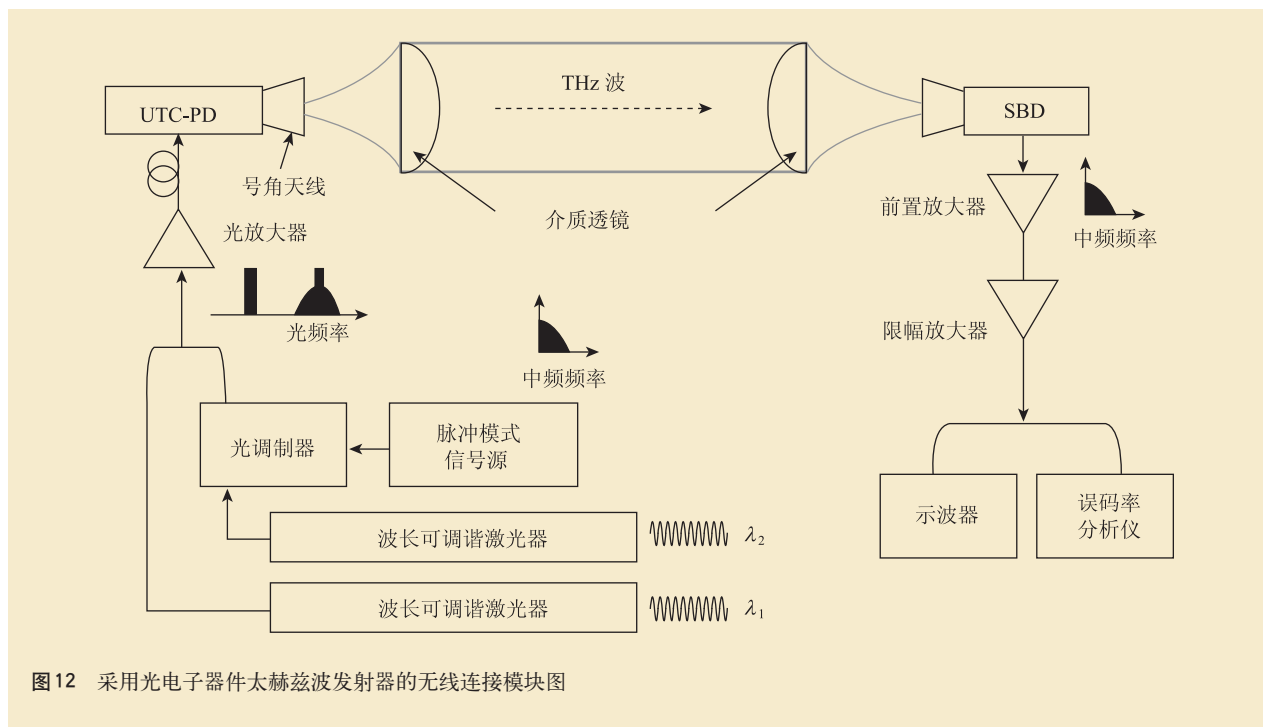


图12 采用光电子器件太赫兹波发射器的无线连接模块图

6.1 300 GHz 频带 24 Gbit/s 比特率无线系统

NTT 公司采用 UTC-PD 作为发射器，SBD 作为探测器，搭建了一套 300 GHz 无线通信演示系统，图 12 为系统模块图^[35]。该系统用于短距离 (0—0.5 m) 传输应用。两个激光器的差频为 300 GHz，调制信号经由标准脉冲发生器 (pulse pattern generator, PPG) 驱动的光强调制器对其中一束光波进行调制，再将两束光波放大后，照射到 UTC-PD 上，利用其差频产生 THz 波，并通过 25 dBi (dBi 为全方向性天线的功率增益的单位) 增益的号角天线发射出去。在接收端利用 SBD 对 THz 波进行直接强度探测。

在 UTC-PD 输出功率约为 200 μW 和电流为 9.5 mA 时，实现了 24 Gbit/s 比特率的无差错传输，误码率能达到 2×10^{-9} 以上。

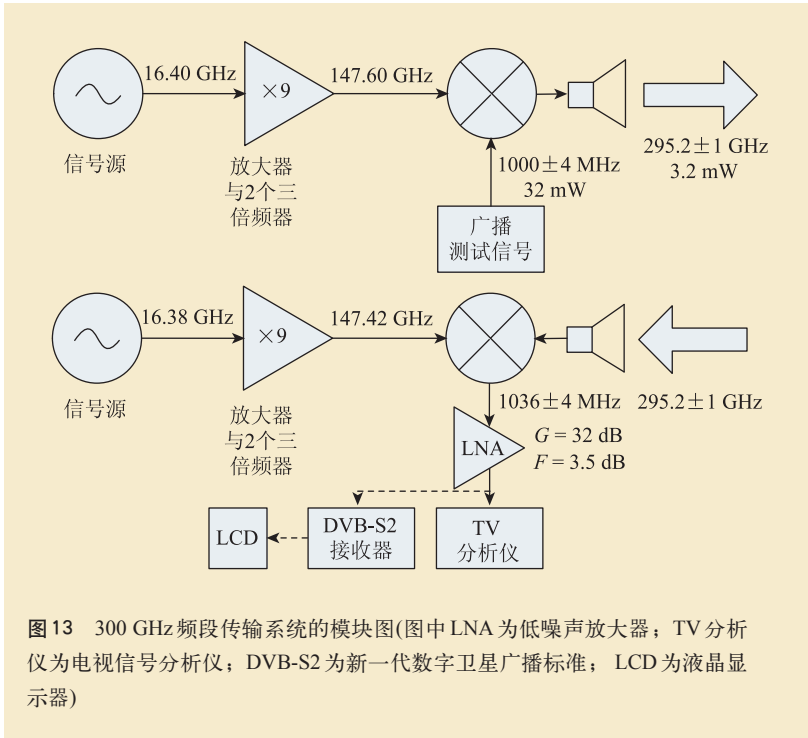
6.2 300 GHz 信道测量系统和视频信号传输的演示

对于 300 GHz 频带的信道测量和传输实验来说，德国联邦物理技术研究院和德国国家计量所

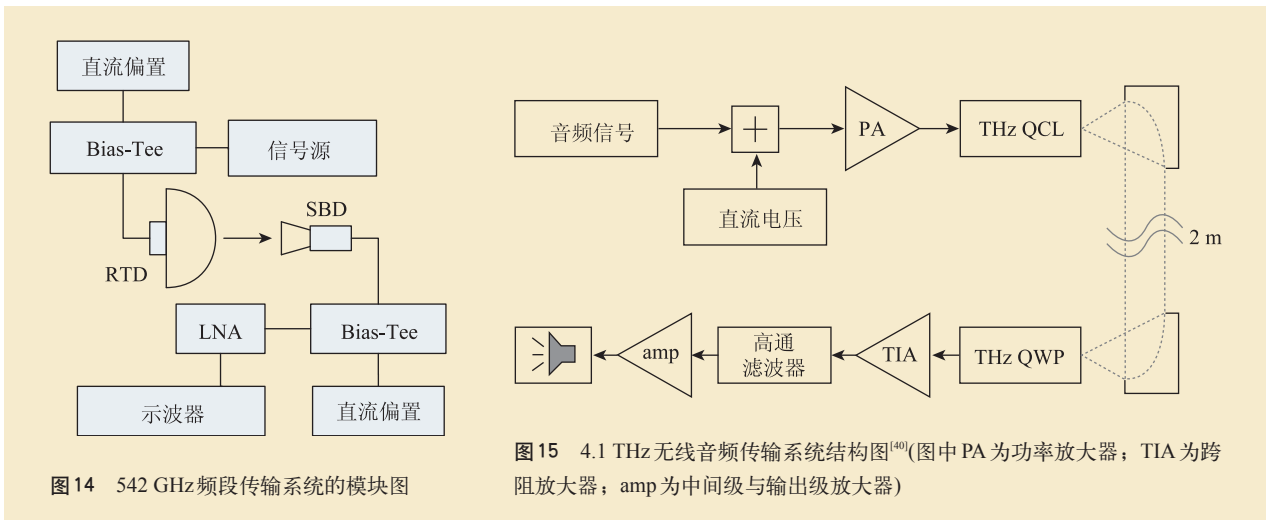
搭建了一套发射与接收模块独立的通用系统。2008 年，德国的 C. Jastrow 等人利用该系统进行了模拟视频信号传输演示，通信距离为 22 m^[36]。系统的原理如图 13 所示。2010 年，他们对该系统进行适当的改进^[37]，实现了 96 Mbit/s 的 DVB-S2 数字信号的传输，并将传输距离提高到了 52 m。该系统含有两个发射器与检波器单元，并利用了肖特基二极管混频器和金属波导技术。在发射端，锁相电谐振振荡器提供 16.66 GHz 的本地振荡，经过两次三倍频后，得到 150 GHz 振荡信号。通过分频谐波混频器，将信号发生器产生的 DC-10GHz 信号搬移至 150 GHz 的二次谐波即 300 GHz 处，并经过喇叭天线辐射出去。其中信号发生器产生的信号功率小于 0.5 mW，辐射出的 300 GHz 信号功率为 50 μW。接收端的器件与发射端相同，只是本地载频为 163.8 GHz，这是为了使下变频后得到的信号落在中频 5 GHz 处。接受信号的上边带经过下变频，频率范围为 5—15 GHz。

6.3 542 GHz RTD 发射源无线通信演示系统

K. Ishigaki 等报道了一套基于 RTD 的 THz 无



线通信系统^[38]。如图14所示, 利用具有偏移缝隙天线结构的RTD作为发射源, SBD作为探测器, 采用强度调制方式, 传输频点为542 GHz。传输速率为3 Gbit/s时, 误码率为 3×10^{-5} , 传输速率为2 Gbit/s时, 误码率为 2×10^{-8} 。由于RTD发射功率仅为210 μ W, SBD接收功率在10 μ W左右, 其传输距离仅为1 cm。信号通过T型偏置器(Bias-Tee)与直流信号叠加, 驱动RTD, 使其工作在负微分电阻区域, 从而产生调制THz波。在接收端, 同



样是利用 Bias-Tee 给 SBD 提供合适的直流偏压, 从而实现了 THz 波的直接探测。

6.4 基于 THz QCL 的无线通信演示系统

加拿大国家研究院微结构科学研究所 H. C. Liu 课题组于 2009 年完成了基于 THz QCL 和 THz QWP 的全光学通信链路演示实验^[39]。链路利用工作在脉冲模式的 THz QCL 作为发射源, THz QWP 作为接收器, 采用强度调制方式, 通信频点为 3.8 THz。QCL 利用真空液氮杜瓦制冷, 产生的 THz 波被离轴抛物面镜 M1 收集, 经过 2 m 的传输距离后, 被

离轴抛物面镜 M2 收集, 并聚焦于 QWP 上, QWP 采用 Janis 液氮连续流制冷, 温度保持在 12 K。在发射端, 使一个重复频率为 455 kHz、脉宽为 8 ns(阈值电压以上时)、最大电压为 17 V 的电压脉冲序列, 用音频基带信号或 500 Hz 正弦信号进行普通调幅(AM 调制), 以此调制后的脉冲电压驱动 QCL。在接收端, 从 QWP 出来的信号经过低噪声放大器放大, 被耦合进索尼收音机天线, 利用收音机的 AM 解调功能, 还

原出原始基带信号。

自2008年开始,中国科学院上海微系统与信息技术研究所开展了基于THz QCL和THz QWP的THz通信技术研究。2010年,曹俊诚课题组首次利用工作在连续模式的THz QCL作为发射源,光导型THz QWP作为探测器,采用强度调制和直接检测方式,实现了THz无线音频信号的传

输,图15为传输系统结构图。系统带宽约为580 kHz,传输频点为4.1 THz,传输距离为2 m^[40]。2012年,采用大离轴抛物面镜搭建了2.4 m通信链路,优化了针对THz QCL的驱动电路和针对THz QWP的信号处理电路。实验测量结果表明,链路的最大传输速率可达5 Mbps,系统延时为220 ns。

表1 300 GHz以上无线通信系统发展的现状

频率	技术手段		比特率/带宽	距离	时间
	发送端	接收端			
0.1—3 THz ^[41]	THz TDS		6 kHz	48 cm	2004年
1 THz ^[42]	THz TDS		1 MHz	1 m	2008年
300 GHz ^[37]	分立元件	分立元件	96 Mbit/s	52 m	2010年
300 GHz ^[43]	RTD	分立元件	1.5 Gbit/s	0.3 m	2011年
300 GHz ^[35]	UTC-PD	SBD	24 Gbit/s	0.5 m	2012年
542 GHz ^[38]	RTD	SBD	2 Gbit/s	1 cm	2012年
625 GHz ^[44]	分立元件	肖特基二极管	2.5 Gbit/s	<10 m	2011年
2.5 THz ^[45]	THz QCL	HEB	1 MHz	3 m	2010年
3.8 THz ^[39]	THz QCL	THz QWP	500 Hz	2 m	2009年
4.1 THz ^[40]	THz QCL	THz QWP	580 Hz	2 m	2010年

7 THz无线通信技术的发展趋势

通过近几年的THz通信关键器件的理论研究与研制,整体结构方案的提出以及表1列出的300 GHz以上无线通信系统发展的现状,THz无线通信领域呈现出以下两个技术发展趋势:

(1)通信速率越来越高

2004年,德国Braunschweig技术大学的Koch等^[41]通过外调制方式,利用THz TDS(time-domain spectroscopy)系统首次实现用THz载波传输音频信号的实验,系统带宽为6 kHz。随着THz发射接收器件研制的不断进步,德国的C. Jastrow等设计了一套300 GHz的传输系统,实现了96 Mbit/s的DVB-S2数字信号的传输,虽然

传输距离达到了52 m,但与其他无线通信技术相比,其通信速率并不高,无法体现出THz载波的优势。而日本NTT公司及与其合作的相关单位在器件方面做了众多的革新,发展了多种类型的THz通信系统,将通信速率提升到10 Gbps以上,其最高速率达到了24 Gbps。虽然NTT公司的THz无线通信系统传输速率高达10 Gbps以上,但其传输距离仅为0.5 m,无法满足一些设备间的互联与常规无线局域网的高速无线链路需求,仅仅只能用作短距离大数据传输。这是由于其系统的THz发射源发射功率仅为 μW 量级。大部分的THz无线通信演示系统采用的是传统的直接探测方式,若采用相干探测方式,其探测灵敏度要提高10—20 dB,传输速率能进一步提高,达到上百Gbps。

对于采用直接探测方式的THz通信系统,目前的SBD探测器其噪声温度较大,而UTC-PD,RTD等发射源发射功率较低,导致接收端的信噪比较低,而直接探测方式需要较高的信噪比,因此只能在近距离实现高速率通信,在距离较远的情况下,接收端信噪比达不到高速率通信的要求。因此,高功率THz发射源和高灵敏度探测器的研制是一个必须突破的技术难点。而基于THz QCL的无线通信系统,虽然THz QWP灵敏度很高,但其需要工作在低温设备中,在将接收信号从低温设备中提取出来的过程中,信号通过同轴电缆时会引入较大的对地电容,限制了数据读取电路的带宽,因此如何改进接收信号从低温设备中提取的方式以及探测端读取电路的设计也是一个技术难点。

相比于直接探测方式,采用相干探测方式的THz无线通信系统对接收端信噪比的要求较低,但目前缺乏具有良好的相干性、频率稳定性的信号源与本振源,高速率的THz外调制器与混频器。因此高速率、低信噪比的微弱信号探测与解调接收系统的研制是另一个技术难点。

(2)发展自由空间THz激光通信

自由空间激光通信系统所面对的天空背景光主要为太阳光散射或反射引起的,太阳光辐射光谱中,天空背景光功率在 $0.55\ \mu\text{m}$ 处为峰值,随波长增加而下降。通信光波选用THz波段($1\ \text{mm} - 10\ \mu\text{m}$,背景光影响可忽略不计。随着THz半导体激光器与探测器的不断发展,基于THz QCL与THz QWP的无线传输演示系统实现了 $3.8\ \text{THz}$ 与 $4.1\ \text{THz}$ 频点上的音频信号传输。相比于其他THz发射源 μW 量级的功率,THz QCL发射功率更大,达到上百mW。相比于激光通信,THz光的衍射极限角度大,散射角大,在同样距离的情况下,对应光斑要大,因此对瞄准精度要求相对较低,易于实现捕获、瞄准和跟踪(APT)。另外,采用光子能量约为可见光($600\ \text{nm}$)光子能量的 $1/500$ 、中红外光光子能量($3\ \mu\text{m}$) $1/100$ 的THz波作为信息载体,能量效率更高。

8 结束语和展望

纵观整个THz通信系统的发展现状,虽然THz通信的前景越来越被看好,而且很多国家和机构都投入了大量的人力、物力和财力进行研究,发展也很迅速,并取得了可喜的阶段性成果,但是要实现THz通信的障碍依然很多,如缺少室温连续工作的高效THz波源,缺少室温工作的THz波探测器,有待开发其他调控THz波的器件(调制器、滤波器、波导、交叉开关)等。目前一些THz通信研究机构提出的比较有代表性的THz通信演示系统方案也主要是针对短距离通信方面,利用其短距离传输与高传输速率的优势,在需要更高传输速率的无线接入网络以及大数据量的近距离无线传输的应用中能得到广泛应用。这种近区数据传输技术会发展成为仪器设备间的无线互联。

在空间传输方面,THz波虽然在大气中有较大衰减,但在外层空间可以做到无损传输,并且背景光对太赫兹波的影响可忽略不计。在军事应用方面,利用其能量集中和方向性强等特点开发的战场雷达与跟踪雷达具有传统通信方式不可比拟的优势,而大气水汽对THz波强烈吸收的特性在隐形作战系统中有巨大实用价值。

目前THz通信还处在关键器件的研究开发与THz通信系统整体结构方案提出及可行性论证阶段,以及实验室的研究与仿真演示阶段,要应用到实际生产中,还有大量的研究工作要做。因此,在THz辐射源、探测及调制技术方面开展研究工作,研制高性能的THz固态器件,解决THz信号的调制和信号处理技术,是THz通信研究的当务之急。可以预见,随着THz无线通信关键器件(THz QCL和THz QWP)各项性能的不不断提高,组网技术的不断成熟,不仅可以促进THz无线通信的发展,而且还可为其他领域(如天文探测、医学诊断等)提供有效的辐射源和探测手段。从长远的角度来看,THz通信技术及其关键器件的发展和日趋成熟将带来巨大的经济和社会效应。

参考文献

- [1] Cherry S. *IEEE Spectr.*, 2004, 4(1): 50
- [2] Jacob M, Priebe S, Jastrow C *et al.* *IEEE Globecom 2009*, Honolulu, USA, Dec. 2009
- [3] Koch M. *Nato Science for Peace and Security Series—B: Physics and Biophysics*. edited by Miles R E, Zhang X C, Eisele H *et al.* Springer Science and Business Media, Dordrecht, Netherlands, 2007. 325
- [4] Roy S, Foerster J, Srinivasa S V *et al.* *Proc. IEEE*, 2004, 92: 295
- [5] O'Brien D C, Faulkner G E, Zyambo E B *et al.* *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41: 58
- [6] Federici J, Moeller L. *Journ. Appl. Phys.*, 2010, 107: 111101
- [7] APT Report on Technology trends of Telecommunications above 100 GHz. ASTAP/REPT 4 (ASTAP19, Manila, 2011)
- [8] <http://www.transferjet.org/en/index.html>
- [9] <http://www.irda.org/displaycommon.cfm?an=1&subarticlenbr=102>
- [10] Asada M, Orihashi N, Suzuki S. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46: 2904
- [11] Nagatsuma T, Ito H, Ishibashi T. *Laser & Photonics Review*, 2009, 3: 123
- [12] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2011, 32: 143
- [13] Masahiro A, Safumi S. *IEICE Electronics Express*, 2011, 8(14): 1110
- [14] Hidetoshi K, Hirotaka S, Riku S *et al.* *Applied Physics Express*, 2012, 5: 124101
- [15] Hirotaka S, Masato S, Safumi S *et al.* *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, 2012, 33: 475
- [16] Kohler R, Tredicucci A. *Nature*, 2002, 417: 156
- [17] Fatholouloumi S, Dupont E, Chan C W I *et al.* *Optics Express*, 2005, 20(4): 3866
- [18] Kumar S, Lee A W M. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 2008, 14: 333
- [19] Williams B S, Kumar S, Hu Q *et al.* *Electron. Lett.*, 2006, 42: 89
- [20] Gellie P, Barbieri S, Lampin J F *et al.* *Opt. Express*, 2010, 18: 20799
- [21] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O *et al.* *Nature*, 2006, 444: 597
- [22] Chan W L, Chen H T, Taylor A J *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94: 213511
- [23] Kleine-Ostmann T, Pierz K, Hein G *et al.* *Journ. Appl. Phys.*, 2009, 105: 093707
- [24] Allen S J, Tsui D C, Logan R A. *Phys. Rev. Lett.*, 1977, 38: 980
- [25] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96: 107401
- [26] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Kelly M M *et al.* *Nature Communications*, 2012, 3: 1
- [27] Hübers H W. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 2008, 14: 378
- [28] Sizov F. *Opto-Electron. Rev.*, 2010, 18: 10
- [29] Mears C A, Hu Q, Richards P L *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57: 2487
- [30] Semenov A D, Gol'tsman G N, Sobolewski R. *Semicond. Sci. Tech.*, 2002, 15: R1
- [31] Lindgren M, Currie M, Williams C *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74: 853
- [32] Liu H C, Luo H, Song C Y *et al.* *Infrared Physics & Technology*, 2007, 50: 191
- [33] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84: 4068
- [34] Grant P, Dudek R, Buchanan M *et al.* *Infrared. Phys. Techn.*, 2005, 47: 144
- [35] Song H J, Ajito K, Muramoto Y *et al.* *Electron. Lett.*, 2012, 48 (15): 953
- [36] Jastrow C, Munter K, Piesiewicz R *et al.* *Electron. Lett.*, 2008, 44(3): 213
- [37] Jastrow C, Priebe S, Spitschan B *et al.* *Electron. Lett.*, 2010, 46(9): 661
- [38] Ishigaki K, Shiraishi M, Suzuki S *et al.* *Electron. Lett.*, 2012, 48(10): 582
- [39] Grant P D, Laframboise S R, Dudek R *et al.* *Electron. Lett.*, 2009, 45 (18): 952
- [40] Chen Z, Tan Z Y, Han Y J *et al.* *Electron. Lett.*, 2011, 47(17): 1002
- [41] Kleine-Ostmann T, Pierz K, Hein G *et al.* *Electron. Lett.*, 2004, 40(2): 124
- [42] Möller L, Federici J, Sinyukov A *et al.* *Opt. Lett.*, 2008, 33 (4): 393
- [43] Takeshi S, Toshikazu M, Masashi K *et al.* *Giga-bit Wireless Communication at 300 GHz Using Resonant Tunneling Diode Detector*. In: *Microwave Conference Proceedings (APMC)*, 2011, 1122
- [44] Möller L, Federici J, Ke S. *THz Wireless Communications: 2.5Gb/s Error-free Transmission at 625 GHz using a Narrow-bandwidth 1 mW THz Source*. In: *General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI*
- [45] Palma F, Teppe F, El Fatimy A *et al.* *THz communication system based on a THz Quantum Cascade Laser and a Hot Electron Bolometer*. In: *The 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2010, 2010, 1*