

# 长波红外无线激光通信技术研究现状

朱宏韬, 代丰羽, 王志勇, 邱仁和

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

**摘要:**考虑到  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  长波红外激光在大气中传输特性优于常用的近红外激光, 长波红外无线激光通信技术成为研究热点。比较了长波红外激光与近红外激光在大气中的传输性能, 介绍国内外长波红外无线激光通信技术研究情况, 并对系统主要关键组件进行了说明。

**关键词:**无线激光通信; 量子级联激光器; 长波红外

**中图分类号:** TN929.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2011)08-0068-04

## Research present situation of LWIR free-space laser communication technology

ZHU Hong-tao, DAI Feng-yu, WANG Zhi-yong, QIU Ren-he

(No.34 Research Institute, CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

**Abstract:** It is known propagation properties of  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  long-wave infrared (LWIR) laser are better than commonly used near-infrared laser in the atmosphere, LWIR free-space laser communications technology become the research focus. This paper should characterize with performance to adverse meteorological conditions when compared with the systems operating in the near IR. The international and domestic situation about LWIR free-space laser communications technology is introduced, and then key technologies of the system are described.

**Key words:** optical wireless communication; QCL; long-wave infrared

### 0 引言

无线激光通信是利用激光束作为载波在空间直接进行信息传输的一种通信技术, 具有通信容量大、防截获能力和抗干扰能力强等突出特点, 十多年来人们开发出的商业化产品在军事和民用部分领域中得到了成功的应用。基于器件成熟程度的考虑, 现阶段的无线激光通信系统普遍采用  $0.78 \sim 1.55 \mu\text{m}$  的近红外激光作为载波, 而近红外激光波长偏短, 大气信道对近红外激光的传输的影响较为严重, 这极大地限制了系统传输距离及通信性能, 进而造成近红外无线激光通信系统无法得到更广泛的应用。因此, 如何降低大气对当前无线激光通信系统的影响成为该领域的研究重点。

根据激光在大气中的传输理论以及大量的外场实验表明, 波长为  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  的长波红外激光所受到的大气影响较近红外激光要小, 无线激光通信系统激光载波如采用长波红外波段将有助于降低大气的影

响, 突破近红外无线激光通信技术在大气信道中的局限性<sup>[1-3]</sup>。长期以来, 器件不够成熟是长波红外激光难以应用到无线激光通信系统的主要原因, 然而随着技术的进步, 特别是一系列小型化、高性能长波红外关键器件的逐渐成熟, 长波红外无线激光通信技术日益具有实用化价值。

### 1 长波红外激光与近红外激光在大气中的传输性能比较

大气信道对激光信号载波的影响主要包括大气吸收、大气散射及大气湍流, 由于长波红外波段与近红外波段同为红外光区域的大气窗口(光束穿过大气层时透过率较高), 大气对长波红外与近红外这两个波段的光波吸收影响基本相等, 因此两者受大气影响的区别主要在于大气散射及大气湍流两方面。

#### 1.1 大气散射

大气散射是造成激光信号大气衰减的主要因素, 包括激光与大气气体分子产生的瑞利散射及与气溶胶粒子(如烟、云、雾、沙粒等)产生的米氏散射, 其中米氏散射在大气散射中起着决定性的作用。根据 Beer

收稿日期: 2011-05-20。

作者简介: 朱宏韬(1977-), 男, 工程师, 主要研究方向为光通信技术。

的理论,传输  $L$  距离,受大气散射影响后激光信号能量的变化情况与散射系数  $\beta_s$  呈反比关系<sup>[1]</sup>:

$$\tau_s(L) \propto e^{-\beta_s \cdot L} \quad (1)$$

其中,  $\tau_s(L)$  为  $L$  距离大气散射后激光能量与光源发射能量的比值,散射系数  $\beta_s$  越小,  $\tau_s(L)$  就越大,即激光信号所受的大气散射影响越小。散射系数  $\beta_s$  与大气可见度  $V$  及激光波长  $\lambda$  有关,由著名的 Kruse 关系式<sup>[2]</sup>:

$$\beta_s = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-\delta} \quad (2)$$

其中,  $V$  为大气可见度,  $\delta$  为不同可见度  $V$  时对应的指数,具体数值由经验公式得到,一般不大于 1.6。

综合式(1)、式(2)可知,波长  $\lambda$  越大,大气散射影响越小,且随着可见度越低,优势越明显。这意味着采用 8~14 $\mu\text{m}$  激光作为信息载波的激光通信终端在大雾、沙尘暴等恶劣天气下的工作性能更优异。

## 1.2 大气湍流

大气湍流使得到达接收端的光束发生光强闪烁、相位畸变等现象,严重影响通信质量与通信链路的稳定性。根据湍流理论,大气闪烁效应与波长呈反比关系,波长越长,光束在大气中受到的大气闪烁越小<sup>[3]</sup>。大量的应用经验也表明,1.55 $\mu\text{m}$  的光波在大气中受到的大气湍流影响明显小于 0.8 $\mu\text{m}$  波段光波所受到的影响<sup>[4]</sup>。

2002 年,贝尔实验室进行了 8.1 $\mu\text{m}$  激光与 0.8 $\mu\text{m}$  激光在大气中传输性能的比较实验,结果表明,在传输 200 米后远红外 8.1 $\mu\text{m}$  光波信号在大气中传输的能量损耗最小仅是近红外 0.8 $\mu\text{m}$  光波的能量损耗的十几分之一<sup>[5]</sup>。如果只从大气光学的角度来进行比较,在 10km 能见度情况下,8~14 $\mu\text{m}$  长波红外激光在大气中的传输损耗仅为近红外激光损耗的百分之一<sup>[6]</sup>。随着器件的成熟,只需采用较小功率、接收孔径、体积就能提高激光在恶劣天气下的通信能力,实现较高可用率的无线激光通信,这样的特性也使得 8~14 $\mu\text{m}$  长波红外激光通信系统被称为“全天候系统”<sup>[7]</sup>。

## 2 长波红外无线激光通信技术发展现状

其实早在 20 世纪 70 年代第一波无线激光通信技术研究高峰时期,当时研制出的 10.6 $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> 气体激光器成为早期无线激光通信系统主要候选光源。由于当时技术条件的限制,制成的 10.6 $\mu\text{m}$  无线激光通信系统体积庞大和功耗高,同时相应的器件没有成熟,信号调制及检测技术也不够理想。进入 20 世纪 90

年代,随着 0.8 $\mu\text{m}$  波段及 1.55 $\mu\text{m}$  波段器件的成熟,大部分无线激光通信系统均采用 0.8~1.55 $\mu\text{m}$  波段的近红外激光。由于近红外短波长光波在大气中受到的影响较严重,使得近红外无线激光通信系统在大气信道中的最大传输距离始终难以增加,应用不够广泛。随着器件技术的进一步发展,特别是一系列小型化、高性能长波红外关键器件的逐渐成熟,大气中传输性能更为优异的 8~14 $\mu\text{m}$  长波红外波段自然重新得到重视。

2004 年,美国圣地亚哥 Maxima Corporation 的 Andrew Pavelchek 等人建立了初步的长波红外无线激光系统,采用功率为 180mW、波长可调范围为 8~12 $\mu\text{m}$ 、可在室温下工作的量子级联激光器(QCL)作为光源,探测器采用室温 HgCdZnTe,平均传输速率达 155Mb/s(最大可达 1Gb/s)<sup>[8]</sup>。2004 年,美国橡树岭国家实验室的 Donald Hutchinson 等人利用波导型 CO<sub>2</sub> 激光器和基于空绝缘波导的 Stark 调制器,建立一个传输距离为 5km、可全天候工作的实验系统,激光器输出超过 1W,采用空气冷却的方式,调制器最高可调制频率达 500MHz<sup>[9]</sup>。2008 年,美国西北大学 Andrew Hood 等人通过分析比较当前的超晶格探测器和量子级联激光器,认为研制可供实际应用的新型长波红外无线激光通信系统的条件已基本满足,而且认为 8~14 $\mu\text{m}$  长波红外系统将可取代当前的 0.8~1.55 $\mu\text{m}$  波段近红外系统,成为下一代无线激光通信技术发展的趋势<sup>[10]</sup>。

国内对采用新型器件的 8~14 $\mu\text{m}$  无线激光通信系统技术研究极少,暂时还没看到相关的研究论文发表。但值得一提的是,近年来国内 8~14 $\mu\text{m}$  长波红外器件的发展十分迅速,中科院上海微系统与信息技术研究所等单位在部分长波红外光电器件领域的研究处于国内领先水平。

总而言之,新型 8~14 $\mu\text{m}$  长波红外无线激光通信技术表现出了极大的技术优势,国外对此的研究已持续多年,关键器件技术发展极为迅速,进行系统工程化的条件已基本满足,当前各研究机构正积极努力将系统实用化、商品化。

## 3 长波红外无线激光通信系统关键组件和技术

长波红外无线激光通信系统结构与近红外系统结构基本一致,需要将近红外器件更换为相应的长波红外器件。其中,系统关键的组件/技术为长波红外激光光源及调制技术、长波红外探测器。

### 3.1 长波红外激光源及调制技术

无线激光通信系统中,作为光源的发光器件应满足以下基本要求:①体积小;②可以调制,调制频率输出特性好;③可靠性高,不仅要求工作寿命长,工作稳定性性能好,而且要求互换性好;④功率可满足需求。

综上所述条件要求,目前最适合于8~14 $\mu\text{m}$ 激光通信技术的激光器为量子级联激光器(quantum cascade laser, QCL)。QCL被誉为具有革命性的新型全固化小型理想中长波红外激光器,具有体积小、相干性好和理论输出功率高等特点。现阶段QCL可实现室温工作条件下输出上百毫瓦的输出功率,同时调制性能十分良好,基本已可以满足一般长波红外无线激光通信系统的需求。

#### 3.1.1 QCL 工作原理

QCL只利用电子在量子阱子能带间的跃迁来产生激光,不用涉及到另一种载流子(空穴)的输运情况,即存在所谓的单极性。QCL是由多层量子结构的导带(或价带)能级间量子跃迁产生激光发射的半导体激光器,输出波长由材料的导带(或价带)中分立能级的相对位置确定,而这一位置可以通过调整有源区量子阱的厚度得以实现。其激励方案是利用垂直于毫米级厚度半导体异质结薄层内由量子限制效应引起的分立电子态。在这些激发态之间产生粒子反转。

目前国际上已研制出3.6~19 $\mu\text{m}$ 中远红外QCL。部分处于常温下工作输出稳定的QCL已经开始商业化,目前市场上可获得的常温工作分布反馈式QCL最高输出功率已超过100mW。

#### 3.1.2 QCL 电学调制方法

在一定范围内,QCL输出光能量与注入的驱动电流大小有关,因此,一般可通过直接控制QCL驱动电流的方式进行QCL强度调制。但是,为了对QCL注入电流实现更独立的控制,需要QCL在结构上进行一些改变,可直接进行电调制的常用QCL结构一般采用三垒结构,三垒结构QCL主要由三部分组成:①两个垂直叠在一起包围有源能带区的波导层;②发出激光的有源能带区;③单独的控制区。电学调制的原理是通过在控制区施加一个偏压,即可很好地控制注入到有源区的电流,通常情况下,将约为1mW的电量输入控制区即可调制接近400mW的激光能量。早在2001年,贝尔实验室就利用经特殊设计的QCL实现10GHz左右的电学调制<sup>[9]</sup>。电调制本质上是通过电学手段来改变QCL内部各能级电子数密度,以最终实现光强的变化。上述电调制方法一般只能应用在CW-QCL。

#### 3.1.3 QCL 光学调制方法

除了电调制之外,还可以采用光学照射的方法对QCL进行调制,该方法的调制频率最高可超过10GHz。2007年,Zervos等人将一束超快近红外飞秒激光聚焦至QCL的前晶面,并与前晶面法线成30°角入射,通过由波长移动而引起的调制增强来实现调制<sup>[10]</sup>。

电调制方法原理简单,所需辅助设备少,但存在以下弱点:①对QCL结构的设计存在一些限制,结构的限制使得激光器的导热性能不能达到最好;②对QCL输出能量会产生一些影响;③最高可调制频率会受到限制。光学调制方法相对于电调制有以下优点:①对QCL在结构上的要求较少;②简单方便,易达到更高的调制频率。此外,光学调制的方法还可以应用于光学波长变换技术。

#### 3.2 长波红外探测器

另一个关键组件是探测器,包括用于光通信数据提取的探测器和用于信号捕获与跟踪的探测器阵列。对于数据信道检测,要求通信探测器具有较高的光子检测效率和单个光子计数灵敏度;而对于信号捕获和跟踪的探测器阵列,要求探测器阵列具有较高的视场角、良好的空间分辨率以及较快的反应速度。

当前,适用于8~14 $\mu\text{m}$ 波段的探测器主要有碲镉汞探测器(HgCdTe)、量子阱探测器(QWIP),以及近年来发展较快的量子级联探测器(QCD)等。

HgCdTe体系材料的红外探测器技术起步较早,早在上世纪60年代就已开始研制,发展至今技术已经非常成熟。由于HgCdTe探测器是带间跃迁,可以获得较高的响应率、探测率,目前市场上有一半以上的红外探测器都属于HgCdTe体系材料制备。但是,HgCdTe材料生长较难,且制备的器件均匀性不够高,因此只适合作为通信探测器使用,难以制成大面积探测器。目前,市场上已有适用于较大速率通信、工作温度较高的HgCdTe探测器。美国贝尔实验室、Maxima Corporation等研究机构研制的8~14 $\mu\text{m}$ 波段无线激光通信系统均采用HgCdTe体系材料探测器<sup>[5,10]</sup>。

QWIP是20世纪90年代发展起来的高新技术,经过多年发展,当前国外已有一些较为成熟的产品推向市场,但价格昂贵,且不易获取。该技术是一种利用量子阱内子带跃迁的红外探测技术,其缺点为:光吸收性能差,量子效率不高。但是量子阱红外探测器可以形成低功耗、低成本、高均匀性和大面积的焦平面阵列(FPA)成像系统,相对HgCdTe探测器有明显的生产率优势。

朱宏韬,代丰羽,王志勇,等:长波红外无线激光通信技术研究现状

QCD 是近年来的研究热点,该技术基于光激发电子从量子阱中束缚态向另一个束缚态的跃迁原理,这将导致更窄的探测峰与更优的噪声特性。QCD 不需要外电场偏置,暗电流能降低到很小的程度,这对降低外读电路的电容饱和度,提高像素的积分时间也有好处,因此,QCD 很具有市场前景。虽然其技术成熟度尚不足以进行实用化,但发展速度极快,近几年来已开发出基于多种材料的 QCD,实验效果很好地体现出 QCD 的优势。

#### 4 结束语

文中简要比较了长波红外无线激光通信系统相对与近红外系统的优势,对长波红外无线激光通信系统及其关键技术的研究进展进行了介绍。随着相关器件的成熟,长波红外无线激光通信技术正处于一个快速成长阶段,凭借其优异的大气传输特性,长波红外无线激光通信系统将成为无线激光通信技术的发展趋势,最终推动无线激光通信技术得到更为广泛的应用。

#### 参考文献:

[1] BIELECKI I Z, KOLOSOWSKI W, MIKOLAJCZYK J, et al. Free-space optical communications using quantum cascade laser[C]. Microwave Radar

- and wireless communications 2008. 17Th Internation conference, 2008:1-4.
- [2] ACHOUR M. Free-Space Optics Wavelength Selection 10 UM Versus Shorter Wavelengths[J]. Journal of optical networking.2003,2(6):127-143.
- [3] RAO R. Optical Properties of Atmospheric Turbulence and Their Effects on Light Propagation[G]. Proc. SPIE,2005, 5832: 1-11.
- [4] ROCKWELL D A, MECHERLE G S. Wavelength selection for optical wireless communications systems[G]. Proc.SPIE,2001,(4530):27.
- [5] CAPASSO F, PAIELLA R, MARTINI R, et al. Quantum Cascade Lasers: Ultrahigh-Speed Operation, Optical Wireless Communication, Narrow Linewidth and Far-Infrared Emission [J].IEEE Journal of Quantum Elec-tronics, 2002,38(6):511-532.
- [6] ZUEV V E. "Laser-light transmission through the atmosphere" in Laser Monitoring of the Atmosphere [M]. E. D. Hinklet, Ed. Heidelberg, Germany:Springer, 1976.
- [7] SERVICE R F. How new Beam May Zap Bandwidth Bottleneck[G]. Science,2001:2454.
- [8] PAVELCHEK A, TRISSEL P, PLANTE J. Long-wave infrared (10 μ m) free-space optical communication system[G]. Proc SPIE,2004,(5160):247.
- [9] HUTHCHINSON D P, RICHARDS R K. All-weather long-wavelength infrared free space optical communications [R]. PHYSICS And Astronomy FREE-SPACE LASER COMMUNICATIONS Optical and Fiber Communications Reports.2008,(2):407-417.
- [10] HOOD A, EVANS A, RAZEGHI M.Type- II Superlattices and Quantum Cascade Laser for MWIR and LWIR Free-space communications[G]. Proc of SPIE,2008(6900):5.
- [11] OVERTON G.光学照射调制量子级联激光器[EB/OL]. [2011-01-26] <http://www.laserfocusworld.com.cn/DeTc.asp?id=534>.

## 集团公司 26 所党委书记江波一行来我所参观、交流

2011 年 6 月 9 日,中国电子科技集团公司第二十六研究所党委书记江波携所内军品研发部门负责人一行 6 人来我所参观、交流。

我所党委书记黄祥、副总工程师闭闾等领导陪同江波书记一行参观了我所展览厅,黄祥书记对我所军民品设备进行了详尽的介绍,江波书记一行对我所的产品和设备表现出浓厚的兴趣,并就大气激光等通信设备进行了重点了解。

参观结束后,江波书记一行与我所有关领导和部门技术负责人进行了座谈。黄祥书记代表全所干部职工对江波书记的来访表示热烈欢迎,随后,由科技计划部李博副主任对我所组织机构、产业结构和设备特点进行了介绍,同时,江波书记也介绍了 26 所发展方面的有关情况,随行的 26 所技术骨干对该所主要设备进行讲解,并就双方合作领域进行了交流。

本次参观交流加强了兄弟院所之间的了解,对增进了双方间的友谊取得了很好的效果,并为今后的进一步合作打下了良好的基础。

