

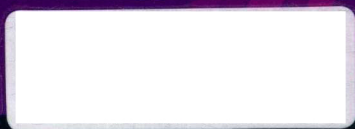


信息科学技术专著丛书

可见光通信技术

张明伦 著

VISIBLE LIGHT COMMUNICATIONS



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



信息科学技术专著丛书

可见光通信技术

张明伦 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书共包含8章,首先介绍了可见光通信的发展历史、技术原理、技术优势等;其次介绍了该技术中常用的光电元件和光学知识,重点阐述了可见光通信中的信道仿真方法、信道特性的分析理论、PSK和OFDM等调制技术、长距离信道衰减的解析计算方法等;最后重点介绍了当下热门的水下可见光通信技术,重点阐述了海水的光学性质及其对信道特性的影响,以及水下信道的仿真技术。

本书适合可见光通信技术领域的研究生或者工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

可见光通信技术 / 张明伦著. -- 北京:北京邮电大学出版社,2022.8

ISBN 978-7-5635-6731-7

I. ①可… II. ①张… III. ①光通信—研究 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第145296号

策划编辑:马晓仟 责任编辑:孙宏颖 责任校对:张会良 封面设计:七星博纳

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路10号

邮政编码:100876

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:唐山玺诚印务有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:10.5

字 数:261千字

版 次:2022年8月第1版

印 次:2022年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-6731-7

定 价:45.00元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

可见光通信技术从提出至今已经有二十余年的时间,在整个发展历程中有过多次高光时刻,吸引了世人的目光。在世界各国和地区,尤其是日本、欧洲和我国,可见光通信技术吸引了大量研究者,他们每年都发表为数不少的论文,如今可见光通信技术被列为 6G 潜在技术之一。

从应用的角度看,可见光通信技术的部署并非没有,但是我们少有耳闻。某些无线通信技术肇始得更晚,但已经在全球范围内得到了广泛应用。造成这一现象的原因,与其说是技术,不如说是缺乏恰如其分的应用牵引。

可见光通信技术颇有特点,其中也存在多个矛盾之处。比如,可见光波段频谱资源的确丰富,但是 LED 带宽有限,光谱又宽,难以有效利用频谱。激光器可有效地改善这一状况。虽然可见光通信是无线通信,但是要求收发端对准,限制了终端的可移动性。

可见光通信的优点是高速,频谱可自由使用,抗电磁干扰能力强,自身不辐射射频电磁波,蓝绿光波段处于水的低损窗口等。其缺点是光源有待进步,接收机的大视场角和大带宽之间矛盾,移动性差等。在引入激光器之后,第二个缺点可能是该技术的一个瓶颈。

广大科研工作者需要努力寻找一个恰如其分的应用场景,这样才能推动可见光通信技术的持续发展。目前,水下可见光通信技术的研究热度持续升高。在水下短距高速通信领域,可见光通信技术确实具有不可替代的地位。其他水下通信技术的速率只能达到千比特每秒的量级,水下蓝绿光通信技术的速率可以达到吉比特每秒的量级,甚至更高。与前者相比,后者的速率提高了百万倍之多,显然,速率已经不是制约该技术得到应用的障碍。解决收发端如何对准,如何设计更高灵敏度的接收机以延长距离等问题更能推动这项技术的发展。工科中的很多问题都来自产业界,科研工作者通过与产业界交流可能会获取一些应用场景。

本书第 1 章阐述了可见光通信技术的发展历史、原理、优势等内容,介绍了国外的一些研究计划。第 2 章介绍了这种技术中常用的光电元件和光学知识。第 3 章和第 4 章重点介绍了室内可见光通信信道仿真技术。第 5 章和第 6 章介绍了 BPSK、QPSK、OFDM 等调制技术。第 7 章阐述了室外长距离可见光通信中的问题。第 8 章阐述了海水的光学特性,以及其对水下信道特性的影响。

本书的内容是作者在实验室多年研究的总结,陈锟、贾银杰、宫树月、林浩然、张雨风、林兴龙、卫晨、王潇正等人对本书的部分章节有贡献,在此一并感谢。

目 录

第 1 章 可见光通信技术概述	1
1.1 可见光通信技术的诞生背景	1
1.2 可见光通信技术的原理	1
1.3 可见光通信技术的优势	2
1.4 可见光通信的意义	3
1.5 国内外的一些研究计划	4
本章小结	7
本章参考文献	7
第 2 章 可见光通信中的器件	8
2.1 发光二极管	8
2.1.1 LED 的调制特性	9
2.1.2 LED 选型	11
2.1.3 光电探测器	11
2.2 可见光通信中的光学	12
2.2.1 光学天线	12
2.2.2 光学技术的优点	13
2.2.3 常见的光学接收天线	13
2.2.4 光学天线的评价指标	13
2.2.5 部分采用光学接收天线的可见光系统传输实验	14
本章小结	20
本章参考文献	21
第 3 章 室内 VLC 信道仿真模型的建立及理论分析	22
3.1 室内 VLC 信道建模及仿真分析	23
3.1.1 建立仿真模型	23
3.1.2 仿真过程及分析	26
3.2 信道特性的理论分析与计算	30
3.2.1 信道损耗的计算	30
3.2.2 均方根时延扩展的计算	32



3.2.3 接收功率的计算	33
3.2.4 接收信噪比误码率的计算	33
本章小结	34
本章参考文献	34
第 4 章 PD 阵列的结构对室内 VLC 信道特性的影响	35
4.1 接收器的特性及主要参数分析	35
4.1.1 光电探测器主要参数分析	35
4.1.2 光集中器与滤波器简介	37
4.2 接收端信道参数仿真分析	38
4.2.1 PD 参数对信道特性的影响分析	38
4.2.2 接收光功率分布情况	39
4.3 分集接收的 PD 阵列结构及其对信道特性的影响	41
4.3.1 分集接收原理简介	41
4.3.2 室内 VLC 中光角度分集接收模型	42
4.3.3 分集接收的 PD 阵列结构设计及其对信道的影响分析	45
本章小结	46
本章参考文献	46
第 5 章 可见光通信系统中调制解调的研究	47
5.1 调制解调技术性能比较及选择	48
5.1.1 带宽需求	48
5.1.2 误码率	49
5.2 DPSK 调制解调技术原理	51
5.2.1 DPSK 调制原理	52
5.2.2 DPSK 相干解调原理	52
5.3 QPSK 调制解调技术原理	53
5.3.1 QPSK 调制原理	54
5.3.2 QPSK 相干解调原理	55
5.4 DQPSK 调制解调技术原理	56
5.4.1 DQPSK 调制原理	56
5.4.2 DQPSK 相干解调原理	57
本章小结	57
本章参考文献	58
第 6 章 OFDM 可见光通信系统	59
6.1 OFDM 原理	59

6.2 DCO-OFDM 与 ACO-OFDM 通信系统	64
6.2.1 DCO-OFDM 通信系统	64
6.2.2 ACO-OFDM 通信系统	68
6.2.3 系统性能比较	69
6.3 OFDM 通信系统关键算法	71
6.3.1 同步算法	71
6.3.2 峰均比抑制算法	75
6.3.3 预失真算法	77
6.4 基于 DCO-OFDM 的室内可见光离线传输系统	80
6.5 关键算法	85
6.5.1 同步算法	85
6.5.2 均衡算法与预均衡算法	88
6.5.3 比特分配算法	91
6.6 离线传输实验及分析	93
6.6.1 发射端和接收端	93
6.6.2 143 Mbit/s 离线传输系统	95
6.6.3 715 Mbit/s 离线传输系统	99
本章小结	103
本章参考文献	103
第 7 章 长距离可见光通信技术	106
7.1 信道损伤	106
7.1.1 自由空间传播衰减	106
7.1.2 大气衰减	114
7.1.3 噪声干扰	117
7.2 光探测器的选择	121
7.3 光学天线设计	121
7.4 莫尔斯码的自动识别系统	123
7.4.1 莫尔斯码的描述	123
7.4.2 问题分析	125
7.4.3 自动识别原理	125
7.4.4 离线仿真与原型机实时实验验证	130
本章小结	132
本章参考文献	133
第 8 章 水下可见光通信技术	134
8.1 海水光学性质研究	134

8.1.1 海水吸收效应	136
8.1.2 海水散射效应	137
8.1.3 海水水体传输特性细分	140
8.1.4 湍流衰落特性分析	142
8.2 水下光信道模型研究	145
8.2.1 水下光信道模型研究概述	145
8.2.2 解析方法	146
8.2.3 数值模拟方法	147
8.2.4 信道模型对比及选择	147
8.2.5 蒙特卡洛光子追踪算法	148
8.2.6 蒙特卡洛海洋信道模拟特性评估	152
8.2.7 不同环境配置对信道特性的影响	155
本章小结	158
本章参考文献	158

第 1 章

可见光通信技术概述

1.1 可见光通信技术的诞生背景

随着科技的不断发展与社会的不断进步,人们对信息的需求不断增加。伴随着社会信息化程度的不断提高,通信行业已经由一个新兴的行业逐步转化为一个国民经济中的基础行业,由开始的井喷式发展逐步过渡到一个相对平稳的高速发展状态,这些转变标志着通信已经成为现代人最为基本的社会生活需求,通信行业也已经深入了我们社会发展变革中的每一个角落。光通信和无线电通信作为当前通信领域的热门技术,已经得到了广泛的应用。可见光通信(Visible Light Communications, VLC)是在发光二极管(Light Emitting Diode, LED)技术上发展起来的一种新兴的无线光通信技术,是当前的研究热点之一。

可见光通信的起源可追溯到 19 世纪 70 年代,当时 Alexander Graham Bell 提出采用可见光作为媒介进行通信的思想,但是当时既不能产生有用的光载波,也不能把光从一个地方传输到另一个地方。20 世纪 60 年代激光器的发明使光通信有了突破性发展,但是其研究主要集中在光纤有线通信和红外等不可见光的无线通信领域。近年来,随着高亮度发光二极管技术的迅速发展,可见光通信技术逐渐发展起来。2000 年,日本的 M. Nakagawa 教授所在的 KEIO 大学课题组首先提出了可见光通信这个基本思想^[1],并在 2003 年成立了可见光通信协会(Visible Light Communications Consortium, VLCC),在 2004 年召开的日本高新技术(CEATEC)大会上,可见光通信协会会长 M. Nakagawa 首次公布了基于白光 LED 的光无线通信技术,阐述了 VLC 的基本原理,指出可见光无线通信技术可以产生一个全新的无线通信网络,在无线通信领域具有广阔的应用前景。

1.2 可见光通信技术的原理

可见光通信技术是指利用高速易调制的 LED 灯将信号经过 LED 器件调制,发出人眼无法察觉到的高速调制光载波信号并在空气中自由传播,然后利用光电探测器(PD)等光电转换器件将光载波信号接收、解调并获得信息。可见光通信系统由光发射机和光接收机组

成,如图 1-1 所示。发射端的调制器负责将数据调制成适合光源传输的信号。Tx 前端依据所传输的比特流,改变光源的发光强度,将信号调制到光载波上。在接收端,光电探测器使用直接检测技术将光载波转换为电信号。Rx 前端含有滤波器和放大器,模拟信号经过滤波和放大,再经过接收端中的解调器,这样就可以处理并恢复出发射端发来的数据。

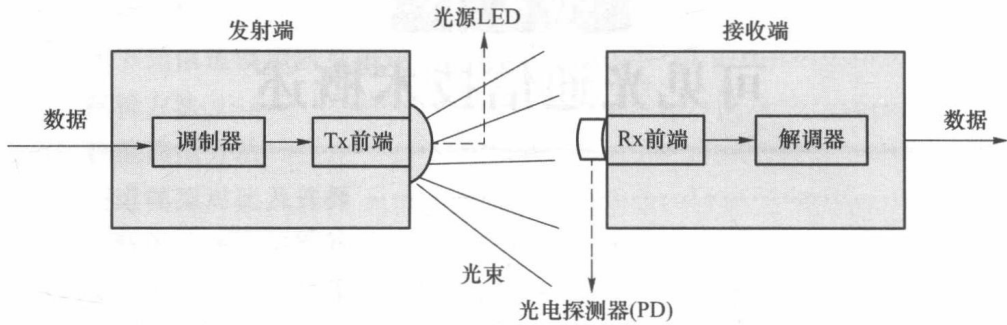


图 1-1 可见光通信系统

1.3 可见光通信技术的优势

现在所使用的无线通信技术主要有 3 种:射频、红外及可见光。相比于前两种,可见光通信有其独特的优势。

与射频通信技术相比,由于光的传播特性,可见光通信技术具有保密性好、安全性高、无电磁辐射伤害、频谱资源丰富等众多优势,并且将通信频段扩展到了可见光频率,有助于缓解无线频谱资源拥挤的状况,是对现有射频技术的一种补充,适合应用于银行、保密机构、医院、机舱等一些对射频信号敏感领域。表 1-1 列出了可见光通信相对于射频通信技术的优势。

表 1-1 射频通信技术与可见光通信技术的对比

属性	射频通信技术	可见光通信技术
安全性	能穿墙	不可穿墙,保密性好
可用带宽	受限于连接数	可空间复用
增加带宽的成本	非常高	几乎没有
发射功率	需限制,通信距离受限	通信情况下无须限制
干扰源	使用相同 ISM 频段的其他用户	太阳光、日光灯
多径衰落	时延、相位变化	无
路径冗余	多个接入点 AP	LED 阵列光源
传输速率	100 Mbit/s	1 到几百兆比特每秒(Mbit/s)
搭建成本	<20 美元	<2 美元

同属于无线光通信的红外通信技术与可见光通信技术,前者出现得更早,技术更加成熟。然而,由于红外线可能对人眼造成伤害,因此其发射功率受到限制,从而导致了它的发

射距离短、传输速率低,另外,由于红外线具有很强的指向性,因此其只能进行点对点的传输,而无法在相互移动的通信设备中使用。而可见光通信技术可以兼顾照明和通信,光源为散射光,对方向性要求不高,因此,通信链路不易被阻挡;同时,由于光源为可见光,不会对人眼造成伤害,因此其发射功率通常情况下无须限制。红外通信技术与可见光通信技术的对比如表 1-2 所示。

表 1-2 红外通信技术与可见光通信技术的对比

属性	红外通信技术	可见光通信技术
信号光源	红外 LED、红外 LD	白光 LED
工作波长	典型波长 800~900 nm	380~780 nm
调制带宽	几十千赫兹到几百兆赫兹	几十千赫兹到几百兆赫兹
室内布局	需另架设红外通信光源和线路	简化了室内线路布局,兼顾照明
阴影效应	容易受其他遮挡物影响	通过安放多个 LED,可消除阴影效应
发射功率	需限制,通信距离受限	通信情况下无须限制

1.4 可见光通信的意义

随着办公环境和家庭中计算机和各种智能设备的普及,室内智能设备之间的高速互联问题成为当前的一个研究热点。RF、红外和 VLC 都是热门的备选技术。可见光通信作为 LED 灯的第二功能,在照明的同时完成通信。与传统的射频通信和其他光无线通信相比,可见光通信具有抗电磁干扰、保密性能好、设备轻便、成本相对低廉、建设周期短、机动性强等优点,既可单独使用,又可与现代常规通信技术相结合,作为其他通信手段的有效补充。

无线频谱资源紧张,可见光通信的引入是对通信频谱的一次巨大拓展。越来越多移动数字终端的使用,尤其是用户对“anywhere, anytime”视频服务的需求,使无线频谱资源即将耗尽。因此需要采用新技术对无线频谱进行扩展,可见光具有 380~780 nm 的巨大带宽(相当于 405 THz),而且可见光对人体无辐射伤害,可见光通信是一种绿色环保的无线通信技术。

可见光通信是一种理想的无线局域网通信技术。第一,由于白光对人眼的安全性,室内白光 LED 灯的功率之和可以高达十瓦以上,这就使可见光通信具备了非常高的信噪比,为其高速通信打下了良好的基础,非其他技术可比。目前可见光通信的实验速率已高达 530 Mbit/s,理论速率可达 3Gbit/s 以上。第二,由于室内表面对光的漫反射,所以即使在有遮挡的地方,也可以进行高速率的通信。第三,由于白光不可穿透墙壁,甚至窗帘,因此可见光通信具有高度的保密性。第四,由于白光和射频信号不相互干扰,所以它可以应用在电磁敏感环境中,如机舱、医院等。第五,由于频谱无须授权即可使用,所以可见光通信应用灵活,可以单独使用,也可以作为射频无线设备的有效备份。

LED 照明的迅速推广,使用于室内可见光通信的光源无处不在。目前世界主要国家都制定了 LED 替代白炽灯的时间表,如表 1-3 所示,这将为可见光通信的发展提供广阔的应用基础。中国是照明产品的生产和消费大国,节能灯、白炽灯产量均居世界首位,2010 年白

炽灯产量和国内销量分别为 38.5 亿只和 10.7 亿只。据测算,中国照明用电约占全社会用电量的 12%左右,采用高效照明产品替代白炽灯,节能减排潜力巨大。逐步淘汰白炽灯,对室内可见光通信的发展提供了非常广阔的应用基础和巨大的市场空间,对于推动实现“十二五”节能减排目标任务、积极应对全球气候变化具有重要意义。

表 1-3 全球各国用 LED 灯替代白炽灯时间表

亚洲	中国	2011 年 11 月 1 日至 2012 年 9 月 30 日为过渡期,2012 年 10 月 1 日起禁止进口和销售 100 W 及以上普通照明白炽灯,2014 年 10 月 1 日起禁止进口和销售 60 W 及以上普通照明白炽灯,2015 年 10 月 1 日至 2016 年 9 月 30 日为中期评估期,2016 年 10 月 1 日起禁止进口和销售 15 W 及以上普通照明白炽灯,或视中期评估结果进行调整
	印度	2010 年之前用节能灯替换 4 亿盏白炽灯
	菲律宾	2010 年之后禁止白炽灯的使用
	马来西亚	2014 年之后停止生产、进口和销售白炽灯
欧洲	欧盟	2016 年之后停用白炽灯和卤素灯
	爱尔兰	2012 年之后停用白炽灯
	瑞士	禁止 F 和 G 级白炽灯的使用
	英国	2011 年之后停用白炽灯
美洲	加拿大	2012 年之后禁用白炽灯
	美国	2020 年之后禁用 45 lm/W 以下的白炽灯
	古巴	2005 年之后禁止进口白炽灯,用节能灯替代
大洋洲	澳大利亚	2010 年之后禁止白炽灯的销售

VLC 潜在的应用领域多样,用户数量巨大,它将会有非常高的经济效益。由于 LED 的节能和低成本特性,所以室内 VLC 将作为一种新型的绿色通信方式为国家的节能减排规划做出巨大的贡献。

1.5 国内外的一些研究计划

1. OMEGA 计划(2008.1—2010.12)^[2]

这是全球最著名的可见光通信研究。OMEGA 计划是在欧盟第 7 框架计划下由欧洲委员会资助的一个家庭高速接入研究计划,其目的在于融合多种通信技术,制定超高速域网(home area network)的全球标准,在不安装新线缆的情况下使每个房间的通信速率都达到 1 Gbit/s。参与者包括著名的德国海因里希·赫兹研究所、英国牛津大学、法国电信、西门子公司等欧洲 21 家单位。

无线光通信技术是该计划中的亮点。可见光通信的计划速率为 100 Mbit/s,实现速率为 280 Mbit/s。基于红外的无线光通信技术实现了 1.25 Gbit/s 的传输速率。

2. 海因里希·赫兹研究所(HHI)^[3-4]

著名的 HHI 隶属于德国弗朗霍夫协会。弗朗霍夫协会是欧洲最大的应用科学研究机构,拥有众多的研究所。HHI 是其下属的著名通信技术研究机构。HHI 是 OMEGA 计划的参与者,也是曾经的可见光通信领域的引领者,其率先于 2010 年实现了 513 Mbit/s(非实时)的可见光通信试验,又于 2011 年刷新了自己创造的纪录,实现了 803 Mbit/s(非实时)的可见光通信试验。

目前 HHI 把研究的重点放在实用化上,是这一方面的领导者,其已实现了两种可见光通信的模块:一种模块可以实现 100 Mbit/s 的 20 m 传输,或者 500 Mbit/s 的 4 m 点对点传输,如图 1-2(a)所示;另一种模块可以使用 WDM 技术实现高达 3 Gbit/s 的点对点传输,如图 1-2(b)所示。

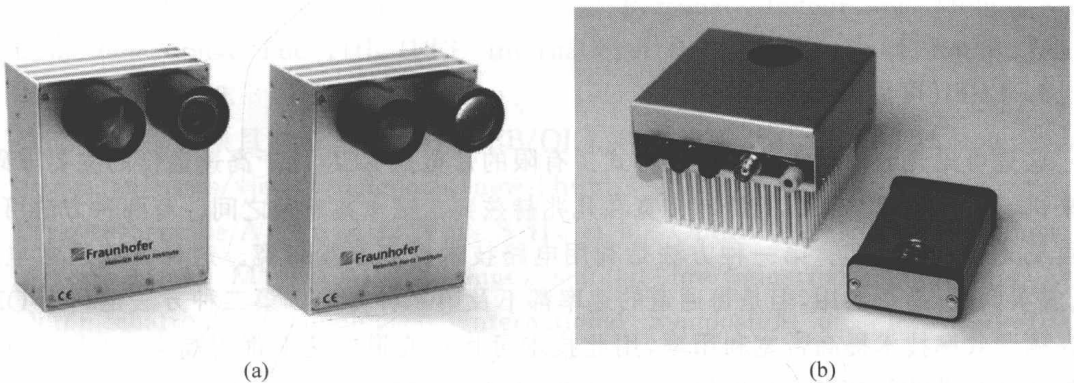


图 1-2 HHI 的可见光通信模块

3. UP-VLC 计划

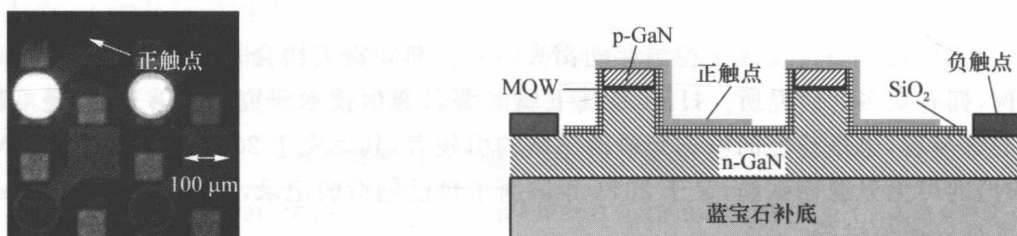
UP-VLC(Ultra-Parallel Visible Light Communications)计划(2012. 10—2016. 9,被资助 460 万英镑)研究了一种颠覆性的技术——Micro-LED 技术,其颠覆性在于研究了新型 LED。该技术一方面大幅度地缩小了 LED 的尺寸,降低了结电容,将 LED 的带宽提高到了 400 MHz 以上;另一方面采用 LED 阵列,弥补了因缩小 LED 而降低的光通量,可以同时实现照明、高解析度显示和高速可见光通信。

根据 2012 年 1 月 JLT 的报道,J. D. McKendry 等人在蓝宝石衬底的外延片上利用标准的制备工艺(standard photolithography techniques)生成了一个 8×8 的 Micro-LED 阵列,他们将每个 Micro-LED 都称为像素,这些像素的中心间距为 $200 \mu\text{m}$ 。该研究组利用 flip-chip bump bonding process 工艺将一个 CMOS 驱动阵列与 Micro-LED 阵列绑定,每个驱动器都可被单独调制,如图 1-3 所示。

经测试,450 nm 峰值波长像素调制带宽可达 435 MHz,远高于照明 LED 的调制带宽。这是因为每个 LED 的 PN 结面积都大大地减小,减小了 PN 结的寄生电容,而 LED 阵列的采用弥补了单个 LED 光通量不足的弱点。据 UP-VLC 研究组估计,Micro-LED 的通信容量可以高达 $\text{Tbit}/(\text{s} \cdot \text{mm}^{-2})$ ^[5]。

与普通的可见光通信技术相比,Micro-LED 技术的门槛高出很多,其强大的通信能力

正好反映出可见光通信领域日新月异的技术发展。



(a) 450 nm峰值发射阵列中的一部分显示，两个像素在工作

(b) 对应的8×8阵列设计的原理图截面

图 1-3 Micro-LED 结构

除上述研究机构和研究计划外，有影响的研究机构还有美国的 UC-Light 中心、三星电子和一些国际知名大学，研究计划还有英国的 D-Light 计划、日本的 e-Japan 计划的一部分等。

4. Li-Fi(可见光局域网)

这是可见光通信最主流的应用方式。有限的带宽是 LED 用于高速通信的主要障碍，一般来讲，普通照明用 LED 的调制带宽在几兆赫兹到二三十兆赫兹之间。有两种方法可以提高可见光通信的速率。第一种方法是利用电路技术提高系统带宽。这种方法通常电路简单、成本低廉，易于实用，但是每通道的速率都不及第二种方法。第二种方法是利用 OFDM 等高频谱效率技术提高带宽利用率，用此技术可将每通道的速率都提高至 1 Gbit/s 以上。但是这种技术的复杂度要高出很多，目前的试验绝大多数是离线试验。

5. 室外中远距离通信

可见光可以实现几十米到数千米距离上的通信，通信的速率随着距离的增长从数兆比特每秒下降到数千比特每秒。与 FSO 相比，可见光通信的速率要低得多，但是 LED 的发射角度较大(通过透镜可以控制在 $2^{\circ}\sim 4^{\circ}$)，而且处于可见光波段，因此收发两端很容易对准。即使要对准移动的收发端，其跟瞄系统也非常简单，成本低廉。日本海岸警卫队曾在 2 km 的距离上进行了 1 024 bit/s 的通信试验^[6]。

Outstanding 技术公司把 1 kbit/s 的通信试验的距离拓展至 10 km 以上，但是所用透镜体积过于庞大^[7]。

6. 水下可见光通信

巨大的衰减使 RF 信号不适合在水下使用，水声通信速率低，延时大，其也不是一种理想的水下通信技术。目前大量使用的蓝光 LED 的波长正好处在海水的低损窗口内，所以有研究者提出使用蓝光 LED 进行水下通信。因为蓝光 LED 具备功率大，电光转换效率高，调制速率高，比水声通信中的换能器更节能等一系列优点，所以水下可见光通信已经成为世界范围内的研究热点之一。它的通信速率可达 1.5 Mbit/s 以上，通信距离从几十米到超过百米，理论上可以进行两三百米距离的通信。利用它可以进行海洋观测、潜水者之间的通信、构建反潜传感器网络，日本还研究用它来进行潜艇标识。

本章小结

本章简述了可见光通信的发展历史、技术原理、技术优势和意义,最后介绍了国内外的
一些可见光通信的研究计划。

本章参考文献

- [1] Tanaka Y, Haruyama S, Nakagawa M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links [C]//Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, The 11th IEEE International Symposium on. London: IEEE, 2000: 1325-1329.
- [2] 欧洲 OMEGA 项目网站. OMEGA[EB/OL]. (2008-01-21)[2016-03-15]. www.ict-omega.eu/news/view/article/neue-news.html.
- [3] Paraskevopoulos A, Vucic J, Voss S H, et al. Optical free-space communication systems in the Mbps to Gbps range, suitable for industrial applications [C]//Optomechatronic Technologies, International Symposium on. Istanbul: IEEE, 2009: 377-382.
- [4] Vucic J, Kottke C, Nerreter S, et al. 125 Mbit/s over 5 m wireless distance by use of OOK-modulated phosphorescent white LEDs [C]//2009 35th European Conference on Optical Communication. Vienna: IEEE, 2009.
- [5] McKendry J. Visible-Light Communications Using a CMOS-Controlled Micro-Light-Emitting-Diode Array[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 30(1):61-67.
- [6] Matsumura T, Ogawa O. Visible Light Communications Consortium Success in Long-Distance Visible Light Communication Experiment Using Image Sensor Communication [EB/OL]. (2008-03-21)[2016-06-15]. www.vlcc.net.
- [7] Nikkei E. 13 km Transmission with Visible Light Makes High-Speed, Short-Haul Transfer Possible [EB/OL]. (2008-05-20)[2015-06-15]. techon.nikkeibp.co.jp.

第 2 章

可见光通信中的器件

2.1 发光二极管

发光二极管是一种特殊的半导体二极管。和普通的二极管一样,发光二极管由半导体芯片组成,这些半导体材料在制作时会通过注入或掺杂等工艺以产生 PN 结架构。发光二极管中电流可以轻易地从 P 极(阳极)流向 N 极(阴极),而相反方向则不能流动。两种不同的载流子(空穴和电子)在不同的正向偏压作用下从电极流向 PN 结。当空穴和电子相遇而产生复合时,电子会跌落到较低的能级,同时以光子的模式释放出能量。而发出光的颜色(即波长)与制造 PN 结的半导体材料有关。

VLC 系统中使用的光源主要有单色光 LED 和白光 LED。相比单色光 LED,白光 LED 具有更广阔的市场前景,它是能够代替白炽灯和荧光灯的重要选择。白色光是由多种单色光复合而成的。对于 LED,目前主要有 3 种方式获得白光。

(1) PC-LED

PC-LED 也就是常说的荧光型 LED。这种方法是在蓝光 LED 芯片封装时,在其表面均匀涂一层黄色荧光粉,通过合理控制黄色荧光粉的密度、数量,可以控制蓝色光和黄色光的比例,从而合成白色光^[1],其光谱如图 2-1 所示。采用这种方法产生白光 LED,制备简单易实现,色温稳定,成本也较低,但容易出现荧光粉涂抹不均匀的情况,导致不同方向色温有波动。但是,黄色荧光粉的响应速度较慢,导致 LED 调制带宽很低。

(2) RGB-LED

这种类型的 LED 是最常见的获取白光的方法,即将红光、绿光、蓝光 3 种色光按一定比例混合得到白色光,如图 2-2 所示。这种 LED 由于不需要荧光粉激发,省去了光的转换,因而具有较高的发光效率。且 RGB 三色光芯片可以独立调制,甚至采用波分复用技术,获取更高的通信速率。除了 RGB 三色光组合的方式,还可以添加更多色光的 LED,目前四色 LED 也在研究中心逐渐投入使用,但是随着 LED 数量的增多,光效却会下降。且 RGB-LED 相对 PC-LED 成本较高,调制电路复杂,目前的普及率不及 PC-LED,但非常有希望用于未来的高速信号传输。

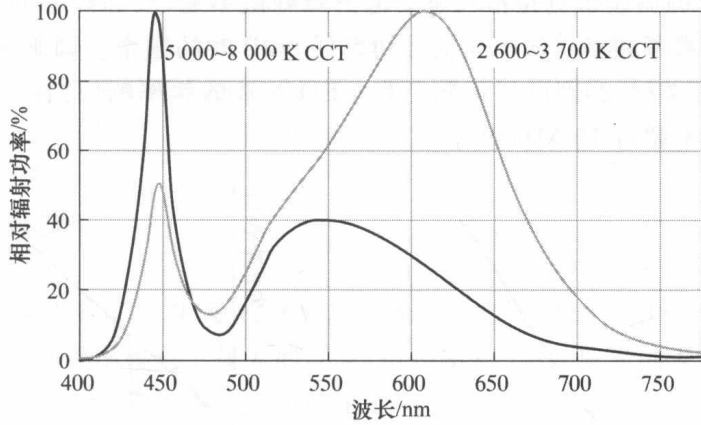


图 2-1 蓝光 LED+荧光粉白光光源相对辐射功率谱

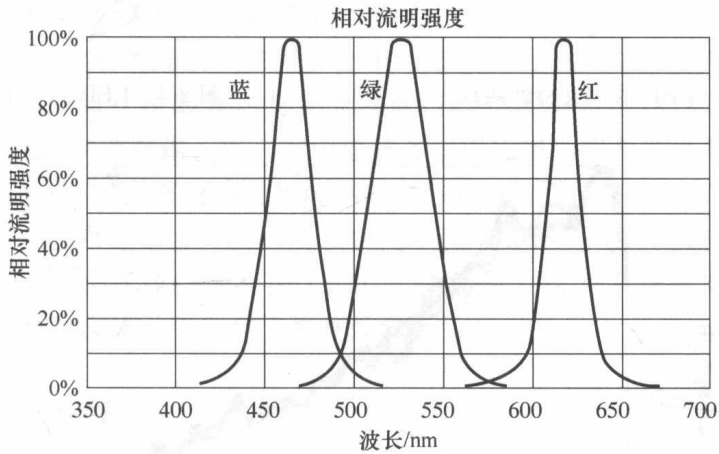


图 2-2 三基色合成白光光源的相对辐射功率谱

(3) UV-LED

这种类型 LED 是通过紫外 LED 与 RGB 荧光粉混合而得到白光的,与传统的荧光型 LED 原理类似。但目前这种方式存在的缺点很多,紫外光转换成白光的过程会有较多的能量损失,光效明显小于 RGB 白光 LED,此外,与之相适应的 RGB 三基色荧光粉不能直接用于此 LED,需要开发适合紫外 LED 芯片光波的荧光粉,另外,最重要的一点,紫外光如果泄漏,将会对人体造成伤害,所以,这种类型的 LED 在可见光通信中很少使用。

2.1.1 LED 的调制特性

LED 的伏安特性曲线如图 2-3 所示。LED 两端加正向电压,电压较小时,外部电场不足以克服内部电场对载流子产生的阻力,LED 呈现较大电阻效应,因此正向电流较小,当电压增大到一定值后,内部电场被大大削弱,LED 电阻变得很小,电流呈指数增长。LED 的调制能力可以由其光功率-电流曲线描述,如图 2-4 所示,LED 的调制深度 m 可定义为 $m = \frac{\Delta I}{I_0}$,其中 ΔI 为偏置电流的交流分量, I_0 为偏置电流的直流分量。调制深度越大,有用光信