

# Information & Communication

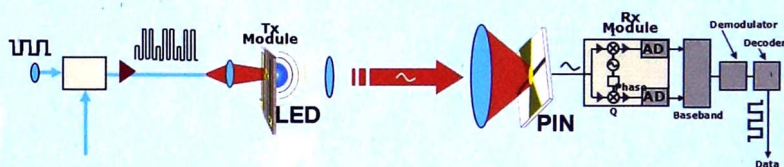


信息与通信创新学术专著

## LED可见光通信 关键器件与应用

Key Devices and Applications of LED  
Visible Light Communication

■ 迟楠 著



# Information & Communication



信息与通信创新学术专著

## LED可见光通信 关键器件与应用

Key Devices and Applications of LED  
Visible Light Communication

■ 迟楠 著

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

LED可见光通信关键器件与应用 / 迟楠著. -- 北京 :  
人民邮电出版社, 2015.8  
(信息与通信创新学术专著)  
ISBN 978-7-115-38697-7

I. ①L… II. ①迟… III. ①发光二极管—光通信  
IV. ①TN383②TN929.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第099466号

## 内 容 提 要

本书详细描述了基于LED的可见光通信关键器件和应用的研究,填补了国内还没有系统描述可见光通信器件和应用的书籍这一空白。全书共分为11章,第1章给出了可见光通信的基本概念,对其发展历史进行了追溯,对研究趋势进行了展望,并且简要介绍了可见光通信的器件和应用;第2~4章详细介绍了可见光通信所采用的器件,包括传统的可见光发射LED器件、新型Micro LED器件和可见光探测器;第5、6章介绍了可见光通信所采用的先进技术和关键算法;第7章介绍了高速VLC通信系统实验,给出了本研究团队基于第2~6章介绍的器件和技术理论基础上的实验成果;第8~10章主要介绍了可见光通信在定位和手机等方面的新型应用和技术成果;第11章对可见光通信技术的未来发展进行了展望。

本书内容系统全面,结构体系具有创新性,理论与实践结合,吸纳最新成果(包括作者本人及合作者的科研成果),各章附小结,可以作为高等院校光学工程、信息与通信技术、光电材料等相关专业的研究生和本科生的教材,也可以作为从事可见光通信技术研究的科学和工程技术人员参考书。

- 
- ◆ 著 迟楠  
责任编辑 代晓丽  
责任印制 彭志环
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
固安县铭成印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 700×1000 1/16  
印张: 18.5 2015年8月第1版  
字数: 363千字 2015年8月河北第1次印刷
- 

定价: 88.00元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316  
反盗版热线: (010) 81055315

# 前 言

“智慧家庭”的兴起，计算机、智能设备的迅速普及，使移动数字终端的范畴发生革命性的变化，给传统接入网技术带来了巨大的考验。光纤到户“最后一公里”的困境、无线接入网频谱资源的紧张、RoF 技术的不成熟和电磁辐射都制约这个瓶颈的突破。当今世界正在演绎一场“Anywhere, Anytime”接入方式的深刻变革，社会也在呼唤一种拓宽频谱资源、绿色节能、可移动的接入方式。由此，可见光通信应运而生。

可见光通信采用 LED 作为光源，利用 LED 灯光承载的高速明暗闪烁信号来传输信息，使 LED 照明的同时可以高速通信。由于 LED 具有效率高、价格低及寿命长等优点，逐渐取代白炽灯、日光灯成为主要照明光源已经成为必然的趋势。2011 年，我国已经公布了逐渐淘汰白炽灯路线图，计划在 2016 年全面禁止普通照明用白炽灯的销售。LED 成为下一代照明技术已是大势所趋，固态照明的普及将使可见光通信的光源无处不在。因此，利用 LED 作为光源的可见光通信技术将站在巨人的肩膀上，随着 LED 的发展而高速发展。由于 LED 的节能和低成本特性，可见光通信将作为一种新型的绿色通信方式为国家的节能减排战略做出巨大的贡献。

回顾可见光通信的发展历程，早在 2000 年，日本研究者就提出并仿真了利用 LED 照明灯作为通信基站进行信息无线传输的室内通信系统。此后，可见光通信迅速获得了世界各国的纷纷关注和支持，在短短十几年间得到了迅猛的发展。从几十 Mbit/s 到 500 Mbit/s 再到 Gbit/s，传输速率不断提升；从离线到实时，从低阶调制到高阶调制，从点对点到 MIMO，技术上一日千里。可见光通信被《时代周刊》评为 2011 年全球五十大科技发明之一。可见光通信作为一种照明和通信结合的新型模式可以有效地推动下一代照明和接入网的发展和技术进步，已成为国内外竞争的焦点和制高点。

虽然当今可见光通信技术的研究正在经历一个新概念、新技术层出不穷的极



为活跃的发展期，但是仍然面临着一系列制约其发展的问题。其中，一个主要原因在于白光 LED 有限的调制带宽。众所周知，LED 是为照明而设计的，其发光效率高，但对于通信而言，却存在着巨大的缺陷：最广泛使用的蓝光激发黄色荧光粉 LED 的调制带宽只有几 MHz。因此，如何提高 LED 的调制带宽，提高系统传输速率，成为国内外研究者们关注的焦点。

其次，现有的技术中没有专用的高速可见光探测器。现在普遍使用的硅基探测器的灵敏度的表现差强人意，因为这类探测器主要用于红外波段，对可见光波段而言并没有特别好的性能。

另外，从产业发展而言，已有的 Wi-Fi、3G 等技术都有着相应成熟的集成芯片，但可见光通信没有任何专业芯片，因此，无论 LED 灯的信号控制还是接收机信号接收后的实时处理，都需要研究人员自己像“搭积木”一般组建出来。

因此，为了突破这些限制可见光通信发展的瓶颈，更好地将可见光通信技术应用于实际生活中，近年来研究人员研发了许多更适合可见光通信的专用器件，并且设计了一些将可见光通信运用于定位、音频、手机、车联网等方面的实验。本书详细描述了本研究团队基于 LED 的可见光通信器件和应用的研究，填补了国内还没有系统描述可见光通信器件和应用的书籍这一空白，可以作为高等院校学生的教材，也可以作为产业界工程技术人员的入门参考书。

此书的撰写得到了科技部、上海市科委和广东省科技厅项目组相关老师和学生的大力帮助。其中刘立林老师撰写了第 2 章的部分内容，刘立林老师和张帅龙博士撰写了第 3 章中部分内容，江灏、纪新明、王少伟和张永刚老师撰写了第 4 章中部分内容，杨爱英老师撰写了第 7 章部分内容，曾宇、张光辉老师撰写了第 8 章部分内容。同时感谢王一光、李洁慧、黄星星、王智鑫、王源泉、许银帆、施剑阳、陈思源、赵嘉琦和张梦洁同学对本书撰写的支持与帮助。本书成稿时间较短，不足之处在所难免，诚恳希望广大读者多提宝贵意见，以利于我们今后改进和提高。

作者

2014 年 12 月

# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 LED 市场趋势	2
1.2 可见光通信的发展历史	3
1.3 可见光通信的系统架构	6
1.4 可见光通信的国际研究趋势	7
1.5 可见光通信器件	8
1.6 可见光通信应用	9
参考文献	11
第 2 章 可见光发光二极管器件	14
2.1 发光二极管的发展	14
2.2 GaN 基半导体材料的物理性质	16
2.2.1 基本结构和参数	16
2.2.2 光学性质	17
2.2.3 电学性质	18
2.2.4 自发极化与压电极化效应	19
2.3 GaN 基半导体材料的 MOCVD 外延生长	19
2.3.1 图形蓝宝石衬底外延技术	19
2.3.2 GaN 外延生长过程中的演化	21
2.3.3 Si 衬底 GaN 外延生长技术	23
2.4 GaN 基 LED 器件	28
2.4.1 LED 的基本原理	28
2.4.2 LED 的基本结构	30
2.4.3 GaN 基 LED 中存在的 key 问题	31
2.5 光子晶体在 LED 中的应用	35
2.5.1 光子晶体 LED 进展	35
2.5.2 LED 器件光子晶体的制作工艺	36

2.5.3	纳米多孔结构 LED 器件 .....	38
2.6	LED 器件结构对热特性的影响 .....	38
2.6.1	LED 电极图案设计对器件热特性的影响 .....	38
2.6.2	焊点分布对倒装焊接结构热特性的影响 .....	41
2.6.3	荧光粉涂敷方式对白光 LED 器件热特性的影响 .....	42
2.7	小结 .....	44
	参考文献 .....	44
<b>第 3 章</b>	<b>新型 Mirco-LED 器件 .....</b>	<b>50</b>
3.1	Micro-LED 的设计与制作 .....	50
3.1.1	Micro-LED 的结构 .....	50
3.1.2	Micro-LED 的制作工艺 .....	52
3.2	Micro-LED 的器件性能 .....	56
3.2.1	Micro-LED 的电气特性 .....	56
3.2.2	Micro-LED 的光学特性 .....	58
3.2.3	Micro-LED 的调制特性 .....	60
3.3	Micro-LED 的驱动 .....	64
3.3.1	CMOS/Micro-LED 的集成和 CMOS 控制的 Micro-LED 器件 .....	65
3.3.2	CMOS 驱动器的布局 .....	65
3.3.3	CMOS 驱动器的逻辑电路 .....	66
3.3.4	CMOS 芯片倒装封装 .....	67
3.3.5	CMOS 驱动板 .....	67
3.4	Micro-LED 在可见光通信中的应用 .....	68
3.4.1	单信道数据传输 .....	68
3.4.2	VLC 中基于 CMOS 控制 Micro-LED 器件 .....	71
3.5	小结 .....	77
	参考文献 .....	77
<b>第 4 章</b>	<b>可见光探测器 .....</b>	<b>82</b>
4.1	InGaN 光电探测器 .....	83
4.2	InGaN 可见光探测器的类型、结构与外延生长 .....	87
4.2.1	InGaN 可见光探测器的类型与结构 .....	87
4.2.2	InGaN 的外延方法 .....	88
4.2.3	InGaN 的背景载流子及 N 型掺杂 .....	90
4.2.4	P 型 InGaN 的制备 .....	92

4.2.5 维加德定律及带隙弯曲参数	95
4.3 InGaN 可见光探测器的种类	96
4.3.1 MSM 结构 InGaN 可见光探测器	97
4.3.2 肖特基型 InGaN 可见光探测器	101
4.3.3 PIN 结构 InGaN 可见光探测器	103
4.3.4 InGaN/GaN 多重量子阱可见光探测器	105
4.4 硅基 PIN 光电探测器	109
4.4.1 特性参数	109
4.4.2 器件制备工艺	113
4.5 窄带蓝光探测器	114
4.6 探测器阵列设计	119
4.6.1 光路系统设计	119
4.6.2 阵列制备	119
4.6.3 信号读取电路结构设计	121
4.7 小结	122
参考文献	122
<b>第 5 章 可见光通信的均衡技术</b>	<b>127</b>
5.1 基于模拟电路的预均衡技术	127
5.2 硬件预均衡电路	129
5.2.1 硬件预均衡电路的仿真	129
5.2.2 硬件预均衡电路的实验验证	131
5.3 软件预均衡	131
5.3.1 基于 FIR 滤波器的预均衡技术	132
5.3.2 基于 OFDM 的软件预均衡技术	139
5.4 软件预均衡技术的仿真	140
5.5 ACO-OFDM 调制	142
5.5.1 ACO-OFDM 调制的原理	142
5.5.2 ACO-OFDM 调制系统的实现原理	144
5.5.3 ACO-OFDM 的性能仿真	145
5.5.4 ACO-OFDM 调制的优缺点	147
5.6 时域加窗技术	148
5.7 小结	150
参考文献	150



<b>第 6 章 可见光通信的信号恢复算法</b> .....	152
6.1 时钟恢复.....	152
6.1.1 数字滤波平方定时估计算法.....	154
6.1.2 Gardner 算法.....	155
6.1.3 Godard 算法.....	156
6.1.4 Muller 算法.....	158
6.2 相偏、频偏的估计与补偿算法.....	159
6.2.1 相偏的估计与补偿算法.....	159
6.2.2 频偏的估计与补偿算法.....	163
6.3 时域均衡算法.....	164
6.3.1 CMA.....	164
6.3.2 CMMA.....	167
6.3.3 M-CMMA.....	167
6.3.4 DD-LMS 算法.....	168
6.4 频域均衡算法.....	169
6.4.1 导频辅助信道估计算法.....	169
6.4.2 SC-FDE 算法.....	170
6.5 小结.....	171
参考文献.....	171
<b>第 7 章 高速可见光通信系统实验</b> .....	173
7.1 VLC 系统先进调制技术.....	173
7.1.1 OFDM.....	173
7.1.2 CAP 调制技术.....	177
7.1.3 基于频域均衡的单载波调制技术.....	180
7.2 多用户接入与双向可见光通信系统.....	182
7.2.1 MISO 系统.....	182
7.2.2 双向传输系统.....	186
7.3 VLC 多维复用系统.....	189
7.3.1 波分复用技术.....	189
7.3.2 子载波复用技术.....	191
7.3.3 偏振复用技术.....	195
7.4 可见光 MIMO 技术.....	197
7.4.1 可见光成像 MIMO.....	198
7.4.2 可见光非成像 MIMO.....	200

7.5 可见光通信组网	202
7.5.1 可见光通信与 MMF 融合网络	203
7.5.2 可见光与 PON 融合网络	204
7.5.3 基于光纤骨干架构的高速全双工可见光接入网	206
7.6 小结	209
参考文献	209
<b>第 8 章 手机可见光通信技术</b>	<b>211</b>
8.1 概述	211
8.1.1 手机通信发展	211
8.1.2 现有手机数据传输技术对比	212
8.2 手机可见光通信技术的应用场景	214
8.2.1 数据传输	214
8.2.2 室内定位	215
8.3 手机可见光通信技术的实现方案	216
8.3.1 系统模型	216
8.3.2 显示单元	217
8.3.3 摄像头单元	223
8.3.4 传输软件	225
8.3.5 系统传输比较	228
8.4 可见光与移动通信融合的展望	229
8.4.1 驱动融合的因素	229
8.4.2 可见光与基站回传融合的优势	231
8.4.3 可见光通信与基站前传的融合	232
8.4.4 可见光通信与移动通信接入的融合	233
8.5 小结	235
参考文献	236
<b>第 9 章 可见光定位技术</b>	<b>238</b>
9.1 室内定位技术现状	238
9.2 可见光定位方法	241
9.2.1 基于三角测量法的可见光定位技术	241
9.2.2 其他定位方法	243
9.3 基于蜂窝式的可见光定位技术	247
9.3.1 LED 光照度分布与阵列设计	247

9.3.2	蜂窝式定位算法	248
9.3.3	越区切换	249
9.4	可见光定位系统光强分布仿真	252
9.5	小结	257
	参考文献	257
<b>第 10 章</b>	<b>VLC 通信技术与应用</b>	<b>259</b>
10.1	可见光音频传输	259
10.2	可见光会议电话	262
10.3	可见光成像通信	263
10.4	可见光移动车联网	265
10.5	可见光通信远距离实验	266
10.6	高速可见光终端	267
10.7	小结	269
	参考文献	270
<b>第 11 章</b>	<b>可见光通信技术的发展趋势</b>	<b>271</b>
11.1	表面等离子体 LED	271
11.2	视觉成像通信	272
11.3	VLC 组网的关键问题	274
11.3.1	可见光光源布局	275
11.3.2	可见光网络切换技术	275
11.3.3	可见光网络接入控制	276
11.4	可见光通信集成芯片	276
11.4.1	LED 发射阵列	277
11.4.2	PIN 接收阵列	277
11.4.3	可见光专用集成通信芯片	277
11.5	可见光通信技术未来展望	279
11.6	小结	280
	参考文献	280
	<b>中英对照表</b>	<b>281</b>
	<b>名词索引</b>	<b>285</b>

# 第 1 章

## 概述

“智慧家庭”的兴起，计算机、智能设备的迅速普及，使移动数字终端的范畴发生革命性的变化，给传统接入网技术带来了巨大的考验。光纤到户“最后一公里路”的困境、无线接入网频谱资源的紧张、ROF（Radio Over Fiber，光载无线通信）技术的不成熟和电磁辐射都制约这个瓶颈的突破。当今世界正在演绎一场“Anywhere, Anytime”接入方式的深刻变革，社会也在呼唤一种拓宽频谱资源、绿色节能、可移动的接入方式。由此，可见光通信（Visible Light Communication, VLC）应运而生。

2000 年可见光通信的概念横空出世，其利用发光二极管（Light Emitting Diode, LED）作为光源，在 LED 照明的同时可以高速地通信。白光 LED 现在已经被广泛应用于信号发射、显示、照明等领域。与其他光源相比，白光 LED 具有更高的调制带宽，还具有调制性能好、响应灵敏度高的优点。利用 LED 的这些特性，我们可以将信号调制到 LED 发出的可见光上进行传输。白光 LED 可以将照明与数据传输结合起来的特性，促进了可见光通信技术的发展。

当今无线频谱资源紧张，很多频段都已经被占用，如图 1-1 所示。VLC 利用的可见光波段尚属空白频谱，无需授权即可使用，因此 VLC 技术抢占空白频谱，有效地利用资源，拓展了下一代宽带通信的频谱，可以解决光通信与无线通信网络共存与兼容的问题。而且与其他无线技术相比，VLC 还具有安全性高、保密性好等众多优点。

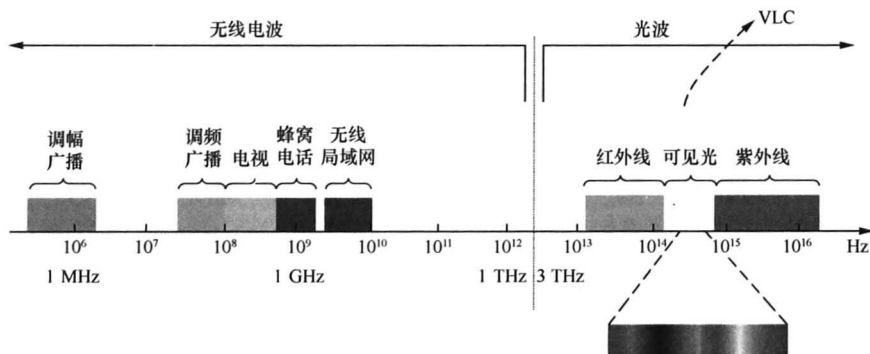
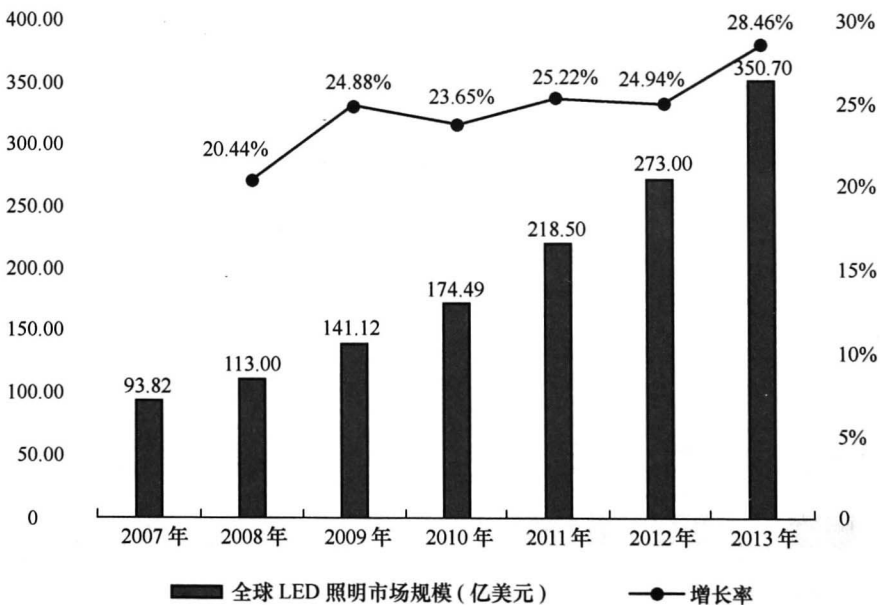


图 1-1 频谱资源示意图

## 1.1 LED 市场趋势

可见光通信利用白光 LED 作为光源，而 21 世纪注定是 LED 的时代。20 世纪 60 年代问世的 LED 在短短数十年里飞速发展，光色从单到多，亮度从低到高，寿命从短到长，市场从无到有。诞生至今以每 10 年亮度提高 20 倍、价格降低为原来 1/100 的速度发展。技术的日趋成熟、功能的不断完善和丰富，给人类社会带来了翻天覆地的变化，其影响已经渗透到全球科技、经济、生活理念等各个领域，尤其是在照明领域具有强大的优势和竞争力。较之白炽灯和节能灯，LED 具有效率高、价格低及寿命长等优点。LED 的能耗分别是白炽灯的 1/10 和节能灯的 1/4，发光效率更高（可达 249 lm/W，约为日光灯 4 倍），寿命高达 10 万个小时，稀土添加量是节能灯的 1/1 000。这些无与伦比的性能使其迅速占据了市场，备受世界各国的青睐，各国陆续推出了白炽灯淘汰计划，传统照明技术正在迅速向固体照明技术演进。LED 的市场份额如图 1-2 所示，各国白炽灯取代路线图见表 1-1。毫无疑问，LED 成为下一代照明技术已是大势所趋。固态照明的普及使 VLC 的光源无处不在，利用 LED 作为光源的可见光通信也将站在巨人的肩膀上，随着 LED 的发展而高速发展。



(来源: IMS Research)

图 1-2 LED 市场份额



表 1-1 全球各国淘汰白炽灯、推广 LED 路线

洲	国别	白炽灯淘汰路线
亚洲	中国	2011 年 10 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
	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 级和 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

## 1.2 可见光通信的发展历史

基于白光 LED 的可见光通信技术，能够以较低的成本同时实现照明与通信两大功能，适用于各种接入场景，无电磁干扰，绿色环保。由于 VLC 技术的这些优点，其问世就很快获得了世界各国的关注和支持，从诞生至今的短短十几年间，VLC 技术得到迅猛发展，取得了一个又一个突破性的进展。

日本研究者首先提出了 VLC 的概念。早在 2000 年，日本研究者就提出并仿真了利用 LED 照明灯作为通信基站进行信息无线传输的室内通信系统。至此之后，日本的研究者看到了 VLC 的发展前景，投入了大量精力进行研究。2009 年，中川实验室提出了一种基于载波监听多路访问/冲突检测（CSMA/CD）的全双工

多址接入的可见光通信系统，实现了 100 Mbit/s 的高速通信。为了实现可见光通信的实用化，可见光通信联盟（VLCC）于 2003 年在日本成立，并迅速成为国际性组织。目前，日本的 VLC 技术已经从系统传输研究走向了实际应用研究，已经提出了 VLC 技术在广告牌、灯塔、定位、智能交通系统等多方面的应用。2008 年，在日本九十九里海滩进行了利用灯塔上的 LED 作为发射机、图像传感器作为接收机的可见光通信实验，实现了可见光通信最远传输距离 2 000 m，传输速率 1 022 bit/s。2009 年，VLCC 展出了应用 VLC 技术的数字广告牌样品，该广告牌利用其背光 LED 传输数据，使用者可以根据需要下载信息。2010 年，VLCC 与日本交通管理技术协会进行了以图像传感器作为接收机、利用 LED 交通信号灯作为发射机的可见光通信实验，并取得了成功，传输速率 4 800 kbit/s，距离 300 m。2012 年，庆应义塾大学的研究者提出了针对视障者的语音辅助系统，使用智能手机检测用户的位置信息并引导用户。日本在基于 VLC 技术的产品开发方面也已经迈出了研究步伐。2012 年，卡西欧开发出了一款新的苹果应用程序“Picapicamera”，利用可见光技术就可在用户之间即时分享拍摄的照片。

虽然可见光技术的发源地在日本，美国、欧盟的起步相对较晚，但是美国和欧盟的研究者们也不甘落后。由于政府的重视，研究资金充裕，现已取得了许多优异的成绩。2008 年，欧盟开展 OMEGA 项目，发展 1 Gbit/s 以上的超高速家庭接入网研究，VLC 技术是研究焦点之一。搭建的测试网络理论速度为 1.25 Gbit/s，最高传输速度为 300 Mbit/s。2008 年，美国国家科学基金会资助开展“智能照明通信（SLC）”项目，主要为 VLC 技术研究。2011 年，德国、挪威、以色列与美国等共同成立 Li-Fi 联盟，进行航天系统中的连网研究，利用 VLC 技术实现飞行时的无线网络环境。2012 年，在英国工程与自然研究理事会（EPSRC）的资助下，英国、美国的科学家开展“超并行可见光通信（UP-VLC）”项目，探索自由空间和空间复用导波 VLC 的实施方案。柏林的研究机构海因里希赫兹研究所与西门子合作进行高速 VLC 技术研究，2012 年利用 DMT 离散多音调技术，采用 RGB-LED 的发射机、基于正一本征一负（PIN）的接收机，实现了单信道 806 Mbit/s（红光信道）的传输速率。

日本、欧盟、美国关于 VLC 技术的研究最多，其他国家，如韩国、意大利等，也有一定的研究。韩国三星通过与牛津大学合作，进行了一些 VLC 实验，2009 年，采用后均衡技术实现了 100 Mbit/s 不归零码（NRZ）的传输速率；2012 年，意大利的圣安娜高等研究院采用波分复用（WDM）和 DMT 技术，以 APD（雪崩光电二极管）作为接收机，实现了 VLC 系统 1.5 Gbit/s 的单信道传输和 3.4 Gbit/s 的多信道传输。

在国内关于 VLC 技术的研究也越来越受到关注，但研究的地区差异较明显。

中国台湾地区关于 VLC 技术的研究较多,水平也比较先进。2012 年,中国台湾交通大学进行了 VLC 传输实验,采用了无载波幅度和相位调制 (CAP) 技术,以 PIN 作为接收机,实现了 1.1 Gbit/s 的传输速率;2013 年,通过使用 WDM 技术,以 PIN 作为接收机,又实现了 3.22 Gbit/s 的传输速率。中国大陆地区关于 VLC 技术的研究较少,已经明显落后于国际水平。北京邮电大学、南京邮电大学、复旦大学、东南大学、中国科学院半导体所等都在开展相关研究,正在努力追赶国际步伐,并取得了一定的成就。

我们对近年来 VLC 的突破性传输实验做了全面统计,见表 1-2。VLC 技术在短短十几年间迅猛发展,传输速率不断提升,从几十 Mbit/s 到 500 Mbit/s,再到 800 Mbit/s,现在已经突破 Gbit/s,实现更高速率的通信也已经近在眼前;从离线到实时,从低阶调制到高阶调制,从点对点到多输入多输出 (MIMO),技术上也一日千里;VLC 技术被《时代周刊》评为 2011 年全球五十大科技发明之一。由此可见,当今 VLC 技术的研究正在经历一个新概念、新技术层出不穷的极为活跃的发展期。我们也有理由相信,VLC 作为一种照明和光通信结合的新型模式,推动着下一代照明和接入网的发展和技术进步,已经成为国际竞争的焦点和制高点。

表 1-2 VLC 系统实验传输速率总结

	均衡	调制方案	实验速率	接收机	传输距离 (m)	研究机构
白光信道		OOK-NRZ	1 022 bit/s	成像传感器	2 000	可见光通信联盟
白光信道	预均衡	OOK-NRZ	40 Mbit/s $BER < 10^{-6}$	PIN	2	牛津大学
蓝光信道	预均衡	OOK-NRZ	80 Mbit/s $BER < 10^{-6}$	PIN	0.1	牛津大学
白光信道		OOK-NRZ	100 Mbit/s	APD	3	中川实验室
蓝光信道	后均衡	OOK-NRZ	100 Mbit/s $BER < 10^{-9}$	PIN	0.1	三星电子
蓝光信道		DMT-QAM	200 Mbit/s $BER < 10^{-3}$	PIN	2	弗朗霍夫研究所
MIMO 白光信道	后均衡	DMT-QPSK	220 Mbit/s $BER < 10^{-3}$	成像传感器	1	牛津大学
蓝光信道		DMT-QAM	513 Mbit/s $BER < 2 \times 10^{-3}$	APD	0.27	西门子
RGB		DMT-WDM	803 Mbit/s $BER < 2 \times 10^{-3}$	APD	0.12	弗朗霍夫研究所

(续表)

	均衡	调制方案	实验速率	接收机	传输距离 (m)	研究机构
RGB		DMT	806 Mbit/s $BER < 2 \times 10^{-3}$	PIN	0.08	弗朗霍夫研究所
蓝光信道		DMT-QAM	1 Gbit/s $BER < 1.5 \times 10^{-3}$	APD	0.1	圣安娜高等 研究学院
白光信道	后均衡	CAP	1.1 Gbit/s $BER < 10^{-3}$	PIN	0.23	中国台湾交通大学
RGB		DMT-WDM	3.4 Gbit/s $BER < 10^{-3}$	APD	0.1	中国台湾交通大学

### 1.3 可见光通信的系统架构

一个基于白光 LED 的可见光通信系统框图如图 1-3 所示。该系统包括完整的发射、信道传输和接收部分。原始的二进制比特流经过预处理和编码调制之后，驱动 LED，对 LED 进行强度调制，将电信号转换为光信号。预处理，即预均衡，是为了补偿器件、信道对信号带来的失真，通过采用预均衡技术提高 LED 的调制带宽，提高传输速率。而在接收端进行的后均衡，可以补偿其他信道损耗，如采样时钟频偏等。我们将在第 5 章中详细介绍均衡技术的原理。编码调制是为了在有限的带宽上实现更高的传输速率。由于受到可见光通信带宽的限制，为了提高白光 LED 通信系统的传输速率，在发射端可以通过设计和采用高阶的调制编码技术来提高传输的频谱效率，从而实现高速传输。目前研究者们采用最多的高阶调制格式为正交振幅调制—正交频分复用技术 (QAM-OFDM)。

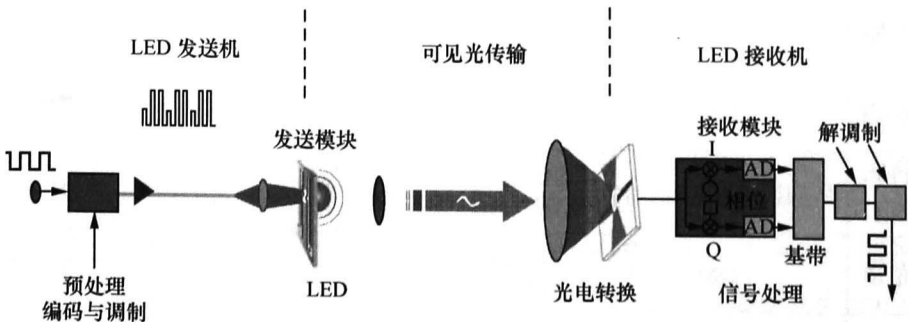


图 1-3 可见光通信系统框图