



可见光通信 新型发光器件原理与应用

Principle and Applications of
Novel Light-Emitting Devices for
Visible Light Communication

欧海燕 沈超 著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程
网络强国建设

可见光通信关键技术系列

可见光通信新型 发光器件原理与应用

Principle and Applications of
Novel Light-Emitting Devices for
Visible Light Communication

欧海燕 沈超 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

可见光通信新型发光器件原理与应用 / 欧海燕, 沈超著. — 北京: 人民邮电出版社, 2020.5

(可见光通信关键技术系列)

国之重器出版工程

ISBN 978-7-115-51813-2

I. ①可… II. ①欧… ②沈… III. ①光通信系统—
发光器件—研究 IV. ①TN929.1②TN43

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第179846号

内 容 提 要

本书介绍了一系列新型氮化物发光器件的结构设计、制备工艺和性能表征。这些新型器件包括表面等离激元增强 LED、纳米柱 LED、近紫外 LED、超辐射氮化镓、半极性和非极性氮化镓激光器、多段式氮化镓激光器、光子集成电路以及垂直腔面发射激光器。本书重点分析了这类新型器件的电学与光学特性,并讨论了不同器件在可见光通信应用中所具有的显著优势。

本书取材新颖,内容翔实,集成了国际上氮化物发光器件领域最前沿的热点方向与研究成果。适用于从事发光器件和可见光通信系统研究的广大工程技术人员阅读,也可作为通信、电子、光学等专业和相关培训班的教学参考书。

◆ 著 欧海燕 沈超

责任编辑 代晓丽

责任印制 杨林杰

◆ 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: 720×1000 1/16

印张: 11.5

2020年5月第1版

字数: 209千字

2020年5月河北第1次印刷

定价: 108.00元

读者服务热线: (010) 81055493 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		

专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国工程院院士
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐** “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成** 中国工程院院士
- 闻雪友** 中国工程院院士
- 徐德民** 中国工程院院士
- 唐长红** 中国工程院院士
- 黄 维** 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 黄卫东** “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥** 中国工程院院士
- 董景辰** 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏** “长江学者奖励计划”特聘教授



前 言

技术的进步推动着社会的发展，并深刻影响着人类的思维方式。在日新月异的技术爆炸时代，能够产生深远影响的技术，无不顺应天时、地利和人和，三者缺一不可。通俗来讲，知识是技术的先驱，会经历比技术发展更长周期的积累。当技术发展成熟后，还需要面对市场的选择，最终胜出的一定是能解决当务之急的性价比最高的解决方案。

通信是一项古老的技术，可以追溯到万里长城上的烽火台。现代通信技术依据电磁载波波段的的不同，可划分为无线电波通信（30 Hz~300 GHz）、光通信等，其中微波（300 MHz~300 GHz）是无线电波高频段，微波通信有时会单独列出。其发展过程中波长在不断变小。不断变小的波长带来的好处是不断提高的通信速率和带宽。通信领域的新旧技术不是取代关系，上面提到的通信技术都还存在，呈互补关系。

可见光通信使用的波段比目前使用红外波长的光通信的波长更短。随着传统通信的频谱资源越来越稀缺，可见光波段目前还未被规划和标准化，因此可见光通信技术在近十年来成为了研究热点。该技术的快速发展也离不开氮化物基发光器件的技术突破。作为高效率的白光光源，LED 灯迅速渗入市场，取代效率较低的白炽灯和荧光灯。该类器件作为信号发射器，使得可见光通信系统可以和照明系统集成也是该技术的重要优势。研究新型氮化物双功能（照明和通信）发光器件无疑是可见光通信技术的重要课题。本书的作者相信藉以此方面的技术突破，可以促成可见光通信的广泛应用。



本书撰写过程中，得到同事与同行的大力支持，在此对他们的辛勤付出表示由衷的感谢。他们是李洁慧博士（复旦大学信息科学与工程学院）、Ahmed Fadil 博士（丹麦技术大学光子工程系）、欧亦宇博士（丹麦技术大学光子工程系）、林立博士（丹麦技术大学光子工程系）、孙海定博士（中国科学技术大学微电子学院）和李鸿渐博士（加州大学圣巴巴拉分校固态照明与能源电子中心）。

本书第 2 章中用到的薄 p-GaN LED 外延片和第 3 章中用到的黄光 LED 外延片来自日本的名城大学。第 4 章中用到的近紫外外延片来自中国科学院半导体所。第 5~8 章中的部分外延结构是在美国圣巴巴拉加州大学固态照明中心制作的。作者在此对多年来合作者的贡献和付出表示感谢。

本书第 2~4 章讲述的研究成果得到以下丹麦基金的项目支持，在此表示感谢。

① “Super bright light-emitting diodes using nanophotonics (SBLED)” (0603-00494B), Danish Council for Strategic Research.

② “A new type of white light-emitting diode using fluorescent silicon carbide (LEDSiC)” (4106-00018B), Innovation Fund Denmark.

本书第 5~8 章讲述的研究成果得到以下基金项目的支持，在此表示感谢。

① King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST), Grant No. KACST TIC R2-FP-008.

② KACST-KAUST-UCSB Solid State Lighting Program (SSLP).

③ King Abdullah University of Science and Technology (KAUST) baseline funding, BAS/1/1614-01-01.

④ KAUST funding KCR/1/2081-01-01, and GEN/1/6607-01-01.

⑤ KAUST-KFUPM Special Initiative (KKI) Program, REP/1/2878-01-01.

对这些新型器件的研究仍处于研发的不同阶段，希望本书能为不同背景的读者提供有用的参考。由于时间仓促，错误难免，敬请读者指正。



目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 可见光通信系统的应用	002
1.2 可见光通信系统的发展	003
1.3 可见光通信发射器的基本要求	004
1.4 本书章节安排	005
参考文献	006
第 2 章 表面等离子激元增强 LED	007
2.1 表面等离子激元增强 LED 的工作原理	008
2.1.1 表面等离子体模式	008
2.1.2 表面等离子激元增强 LED 的光学特性	010
2.1.3 表面等离子激元增强 LED 的调制特性	012
2.2 表面等离子激元增强 LED 的设计与制备	013
2.2.1 实现等离子体耦合的 LED 外延结构	013
2.2.2 使用 Ag NPs 的 LSP 耦合	017
2.2.3 电驱动表面等离子激元增强 LED 的设计与制备	024
2.3 表面等离子激元增强绿光 LED 的电学表征及其在可见光通信中的应用	025
2.3.1 表面等离子激元增强 LED 的电学特性	025
2.3.2 表面等离子激元增强 LED 在可见光通信中的应用	034
2.4 本章小结	038
参考文献	039
第 3 章 纳米柱 LED	045
3.1 纳米柱 LED 的发展及应用	046
3.2 纳米柱 LED 的设计与工艺	047
3.2.1 纳米球掩膜及刻蚀	047
3.2.2 纳米金薄膜退火及刻蚀	048
3.2.3 电子束曝光及刻蚀	050
3.3 纳米柱 LED 的主要光学表征	051



3.3.1	周期性绿光纳米柱 LED 的光学表征	051
3.3.2	非周期性绿光纳米柱 LED 的光学表征	054
3.3.3	周期性黄光纳米柱量子阱的光学表征	056
3.4	纳米柱 LED 器件在可见光通信中的应用	059
3.5	本章小结	062
	参考文献	062
第 4 章	近紫外 LED	065
4.1	近紫外 LED 的发展历史与现状	066
4.1.1	LED 的历史与发展	066
4.1.2	MOCVD 外延生长现状	068
4.1.3	LED 发展现状	069
4.2	近紫外 LED 的设计及制备	070
4.2.1	LED 台面制造	070
4.2.2	LED 电流扩展层和电极的制造	073
4.3	近紫外 LED 的电学表征	075
4.3.1	NUV LED 器件的 EL	075
4.3.2	NUV LED 器件的 $I-U$ 曲线	076
4.3.3	传统 Ni/Au 电流扩展层的 TLM 测试	077
4.3.4	传统 Ni/Au 电流扩展层的透射率测试	079
4.4	近紫外 LED 在可见光通信中的应用	079
4.5	本章小结	082
	参考文献	083
第 5 章	氮化镓 SLD	089
5.1	SLD 的原理与应用	090
5.2	高性能蓝紫光 SLD 的设计与工艺	092
5.3	基于蓝光 SLD 的白光光源	099
5.4	可见光 SLD 的高频调制及其在可见光通信中的应用	101
5.5	本章小结	104
	参考文献	105
第 6 章	非极性和半极性面氮化镓激光器	109
6.1	氮化镓激光器的发展	110
6.2	非极性和半极性氮化镓激光器的生长与工艺	111



6.2.1 非极性 m 面 GaN 基激光器	111
6.2.2 半极性面 (20 $\bar{2}$ 1) 和 (20 $\bar{2}$ 1) GaN 基激光器	113
6.3 氮化镓激光二极管的测试与表征	115
6.3.1 半极性 InGaN/GaN 量子阱结构的蓝光激光二极管	115
6.3.2 波长 410 nm 的近紫外半极性 InGaN/GaN 量子阱结构的激光二极管	118
6.4 氮化镓激光二极管的高频调制及其在可见光通信中的应用	120
6.4.1 氮化镓激光器的调制特性	120
6.4.2 氮化镓基自注入锁定激光器及其调制特性	121
6.4.3 基于氮化镓激光二极管的可见光通信系统	123
6.5 本章小结	123
参考文献	124
第 7 章 多段式氮化镓激光器和光子集成电路	127
7.1 氮化镓基光子集成芯片概述	128
7.2 氮化镓激光二极管和集成波导调制器	128
7.2.1 蓝光波段集成波导调制器的激光二极管	129
7.2.2 紫光波段集成波导调制器的激光二极管	134
7.3 氮化镓激光二极管和集成光放大器	137
7.4 氮化镓激光二极管和集成波导光接收器	141
7.5 本章小结	145
参考文献	146
第 8 章 氮化镓垂直腔面发射激光器	151
8.1 氮化镓垂直腔面发射激光器介绍	152
8.2 非极性氮化镓垂直腔面发射激光器	154
8.3 氮化镓垂直腔面发射激光器的高频调制	157
8.4 本章小结	158
参考文献	159
第 9 章 总结与展望	161
9.1 回顾	162
9.2 挑战与未来	164
名词索引	167



第1章 绪论

可见光通信 (Visible Light Communication, VLC) 在室内、室外自由空间、水下等诸多领域显示出了广泛的应用前景。本章首先回顾近年来可见光通信主要的发展方向, 从器件角度探讨不同可见光通信系统的性能和最新发展状况, 从而进一步总结作为可见光通信的发射器、氮化物发光器件需要具备的特性。针对可见光通信系统对发光器件的要求, 介绍基于纳米光子学的新型器件结构: 表面等离子激元 LED、纳米柱 LED、近紫外 LED、超辐射发光二极管 (Super Luminescent Diode, SLD)、半导体激光器、光子集成器件以及垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 7 种不同的新型氮化物发光器件。



| 1.1 可见光通信系统的应用 |

作为一种无线光通信技术，可见光通信（Visible Light Communication, VLC）系统在不同应用场景中具有独特优势，也可以有效填补现有射频无线通信技术的不足。可见光通信不仅能够针对现有应用提出新的解决方案，而且能够激发出新的应用。不同市场调研机构的研究表明可见光通信将在未来数年内形成一个广阔的市场。Grand View Research 的研究报告显示，到 2024 年，全球可见光通信市场有望达到千亿美元以上，其中对于网络安全的关切与顾虑将成为重要的增长动力。BCC Research 的研究报告也显示 2018—2023 年，可见光通信市场的年增长率将达到 80%^[1]。Technavio 的《2015—2019 年全球可见光通信市场》报告指出，可见光通信将在智慧城市、物联网、航海、航空、高铁、地铁、井下作业和室内导航等领域显示出独特优势^[2]。

目前可见光通信的主要应用包括以下内容。

- 虚拟现实、增强现实、混合现实与介导现实系统。
- 智能工厂。
- 玩具、娱乐系统、可穿戴器件系统。
- 室内上网与楼宇、室内定位。
- 飞机机舱内通信、航天器系统。



- 智能交通、智慧汽车。
- 保密通信。
- 户外应急通信。
- 电磁敏感区的无线通信。
- 智慧城市。
- 楼宇间通信。
- 水下无线通信。
- 舰船通信等。

随着可见光通信与蜂窝网络、Wi-Fi 等技术的交互与融合，未来将有越来越多的应用落地和技术创新出现。

| 1.2 可见光通信系统的发展 |

自 21 世纪初提出利用常见的照明用白光 LED 实现可见光通信以来，该技术得到了迅猛的发展。2013 年出版的《LED 可见光通信技术》一书系统总结了白光 LED 可见光通信技术的基本原理、硬件结构、信道建模、调制技术以及发展趋势^[3]。在 2015 年，迟楠教授等^[4]系统总结了基于 LED 的可见光通信关键器件和应用的研究。ARNON 等^[5]探讨了室内可见光通信与室内定位、可见光通信的标准化以及新型调制模式在可见光通信中的应用。在 2017 年，GHASSEMLOOY 等^[6]在讨论可见光通信信道与调制技术的基础上，分析讨论了可见光通信在路灯、车辆通信、辅助技术、水下通信、室内定位等领域中的应用。得益于近年来多种新型器件的快速发展，可见光通信系统的性能也得到了快速提升。比如 2015 年利用蓝光激光激发荧光粉制成的白光光源用在可见光通信系统中通过通断键控 (On-Off Keying, OOK) 调制实现了 2 Gbit/s 的传输速率^[7]，而 4 年之后，使用 4 种激光组成的室内可见光通信系统，在波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 时预计可以实现高达 35 Gbit/s 的通信速率^[8]。因此，系统总结适用于可见光通信系统的半导体发光器件，特别是最近几年来一系列新型器件的结构设计、加工技术与光电特性，成为重要且有意义的工作。

从不同的发光器件角度来分类，可见光通信可以分为基于 LED 的可见光通信系统和基于激光的可见光通信系统。近年来，国内活跃在可见光通信研究领域的高校和科研院所主要有复旦大学、中国科学技术大学、清华大学、暨南大学、信息工



程大学、浙江大学、中山大学、北京邮电大学、南京邮电大学、香港科技大学、台湾交通大学、台湾大学、台北科技大学、中国科学院半导体研究所和中国电信研究院等科研院所。国际上除了作者所在的单位之外，英国爱丁堡大学、牛津大学、格拉斯哥大学、日本的东京大学、庆应义塾大学、德国费劳恩霍夫研究所、美国加州大学和伦斯勒理工学院等也在这一领域非常活跃。

可见光通信的产业化在国外起步相对较早，其中英国爱丁堡大学于 2012 年孵化的 PureLiFi 公司已经在 LED 可见光通信领域发布了数款利用 LED 上网的产品。主营自由空间光通信的 LightPointe 于 2016 年在美国加州成立了子公司 Firefly Wireless Networks 开发可见光通信技术。法国 Oledcomm 公司成立于 2011 年，目前集中于研究可见光通信与定位技术。此外，日本和德国的企业和研究机构也开展了可见光通信系统的应用推广。我国高度重视可见光通信技术的发展与应用，除了为“863”等国家科技计划提供扶持之外，也于 2014 年成立了可见光通信产业技术创新联盟。2017 年，广东省成立了智慧可见光产业技术创新联盟，助推我国相关产业的技术转型升级。

| 1.3 可见光通信发射器的基本要求 |

与其他成熟商用的通信系统一样，可见光通信系统硬件包括发射器和接收器。其中发射器分为直接调制的发光器件和外调制的发光器件。由于外调制的发光器件需要额外的调制器，增加了成本，直接调制的发光器件是本书介绍的重点。直接调制的发光器件在可见光通信应用中的要求如下。

① 调制速率高、带宽大。商用的使用黄光荧光粉 LED 的白光光源的调制速率受限于荧光粉，调制速率仅为 10 Mbit/s，蓝光 LED 芯片的调制速率较高，可达 20~40 Mbit/s。新型的 LED 研究旨在获得更高的调制速率。

② 流明效率高。LED 光源可以取代传统的白炽灯的一个主要原因是它节能，所以新型的发光源也要继续保持这个优点。

③ 小型化。半导体芯片本身有小型化的优点，作为发射器，要求除了芯片以外的控制部分，如电驱动，电调制和热管理等也要实现小型化。

④ 寿命长。这样可以保持系统的维护成本低，这在人工成本高的国家和地区尤为重要。



| 1.4 本书章节安排 |

对于可见光通信系统中的发射端,传统的 LED 并不能满足可见光通信领域中诸多应用对带宽、效率等方面的要求。本书描述了几种适用于可见光通信的新型发光器件的研究,重点讨论了这些器件的工作原理、设计、制备和测试。

第 2 章利用纳米金属颗粒的表面等离子体技术来提高绿光 LED 的发光强度和调制带宽。测试结果表明,30 nm 厚 p-GaN 的 SP LED 的 10 dB 带宽可达 152 MHz。

第 3 章利用纳米制备技术,实现纳米柱的 LED。纳米柱 LED 可以释放材料应力,提高 LED 效率,同时减小单个发光体的体积,提高调制速率。由测量得到的载流子寿命推算出的纳米柱 LED 的 3 dB 带宽可达 234 MHz。

第 4 章描述近紫外 LED 的设计、制备和光学表征。测试结果表明,近紫外 LED 的 3 dB 带宽可达 175 MHz,10 dB 带宽达 230 MHz。

第 5 章介绍氮化镓超辐射发光二极管的原理与应用。SLD 作为一种新型发光器件,具有较高的调制带宽,使用吸收器结构制成的蓝光 SLD 具有超过 200 MW 的输出光功率,其调制带宽可以达到 560 MHz。使用倾斜镜面结构的紫光 SLD 则具有高达 800 MHz 的调制带宽。因此,利用蓝紫光 SLD 高速调制特性来实现高速白光通信是一种值得进一步研究发展的技术。

第 6 章从氮化镓激光器的发展入手探讨了基于半极性和非极性新型氮化镓蓝紫光激光器以及它们在可见光通信中的应用。研究发现,生长在半极性 GaN 衬底上的紫光激光器在 400 mA 电流的驱动下,实现了大于 3 GHz 的调制带宽。这类器件对于高速可见光通信系统来说极具应用价值。

第 7 章介绍了多段式氮化镓激光器和可见光波段的光子集成电路 (Photonic Integrated Circuit, PIC)。对于小型、高速和低功耗的光通信系统来说,实现片上光子芯片集成是未来的发展方向。对于氮化镓基发光器件来说,这是一个全新的、尚未广泛研究的领域。这一章介绍了氮化镓激光二极管 (Laser Diode, LD) 集成波导调制器、集成半导体光放大器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA)、集成波导光接收器的工艺技术和器件特性。

第 8 章探讨了氮化镓基蓝紫光垂直腔面发射激光器 (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) 的最新发展。VCSEL 器件具有极低的寄生电容,实验结果