

Development of GaN-Based Resonant Cavity Light Emitting Diodes

Yuancheng Wang, Jianjun Li, Haikuo Wang, Zexu Yuan, Menghuan Wang, Deshu Zou, Jun Han, Jun Deng

Key Laboratory of Opto-Electronics Technology Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing
Email: s201502003@emails.bjut.edu.cn

Received: Nov. 23rd, 2017; accepted: Dec. 12th, 2017; published: Dec. 19th, 2017

Abstract

Resonant Cavity Light emitting Diodes (RCLED) can be regard as the combination of Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) and Light-Emitting Diode (LED). It has the advantage of both LED and VCSEL. Comparing with common led, RCLED has higher power, efficiency and modulation bandwidth, as well as better directionality, spectral purity and temperature reliability [1]. In recent years, many research about GaAs-based red RCLED, GaN-based blue/green as well as near-ultraviolet RCLED have been reported, which is much attractive for industry, medical care and communication [2] [3]. However, there are few generalizations in this field. This paper summarizes the development of GaN-based blue RCLED in recent years.

Keywords

Resonant Cavity, Light Emitting Diodes, GaN, Extraction Efficiency

氮化镓基谐振腔发光二极管发展近况

王元诚, 李建军, 王海阔, 袁泽旭, 王梦欢, 邹德恕, 韩军, 邓军

北京工业大学, 光电子技术教育部重点实验室, 北京

Email: s201502003@emails.bjut.edu.cn

收稿日期: 2017年11月23日; 录用日期: 2017年12月12日; 发布日期: 2017年12月19日

摘要

共振腔发光二极管(Resonant Cavity Light emitting Diodes, RCLED)可视为垂直腔发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSELs)与传统发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)二者的结合, 具

备了传统发光二极管(LED)和垂直腔面激光器(VCSEL)两者的优点。相比于传统LED, RCLED出射的光具有更大的光强、提取效率和调制带宽, 以及更好的方向性、光谱纯度和温度可靠性[1]。近年来, 国际上出现了许多针对砷化镓基红光波段、氮化镓基蓝绿光波段、近紫外波段的垂直腔发光二极管的相关报道, 这些研究成果对于工业、医疗、通讯等领域非常有吸引力[2] [3]。然而, 对于该方面研究工作的概述类文章却很少。本文主要对近年来以GaN为基础的蓝光波段RCLED发展情况进行概述。

关键词

共振腔, 发光二极管, 氮化镓, 提取效率

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

GaN 是一种理想的短波长发光器件材料, 被誉为是继第一代 Ge、Si 半导体材料、第二代 GaAs、InP 化合物半导体材料之后的第三代半导体材料。它与 AlN、InN 组成合金材料的禁带宽度在 0.7~6.2 eV 之间连续可调, 覆盖了从红外到紫外的光谱范围。90 年代以前, 由于受到缺乏合适的衬底材料、材料间位错密度大、n 型本底浓度太高和 P 型掺杂困难等问题的限制, GaN 基发光器件的发展十分缓慢。

随着外延等技术的发展, 人们通过蓝宝石衬底上生长缓冲层 GaN, 成功将 N 型 GaN 材料生长蓝宝石衬底上, 解决了困扰已久的蓝宝石与材料晶格失配的问题; 之后又通过在 P 型 GaN 中掺杂 Mg 元素后升温至 800°C~1000°C, 让 Mg 元素能够充分离子化, 大大加强了 P 型层的电导率; 又通过图形化蓝宝石衬底 (Patterned Sapphire Substrate, PSS) 技术, 使 GaN 材料的纵向外延变为横向外延能够实现更为复杂的工艺设计。在解决这些核心问题后, GaN 半导体材料终于迎来在光电子领域的蓬勃发展。以 GaN 为基础的发光器件主要包括发光二极管(LED)、激光器(LD)、谐振腔发光二极管(RCLED), 其中 GaN 基 LED 和 LD 已经广泛应用于诸多领域, 譬如照明, LED 车灯, 激光打印, 全彩显示, 液晶显示背光源, 高密度存储等。虽然 GaN 基垂直腔发射激光器 VCSEL 具有功率高、方向性强、圆形光斑对称等诸多优点, 但工艺复杂, 对 DBR 反射率有较高的要求, 且需要达到阈值电流产生受激辐射等条件。因此, 许多科研人员将目光转向了与 VCSEL 具有相同谐振腔结构, 但发光机理为自发发射的谐振腔发光二极管(RCLED)。与 VCSEL 相比, RCLED 具有以下优势:

- 1) VCSEL 需要达到阈值电流才能发生受激辐射, 而 RCLED 驱动电流较小; 不需要达到阈值条件就可产生激射;
- 2) RCLED 工艺相对简单, 成本较低;
- 3) 相比于 VCSEL 对温度敏感的缺点, RCLED 具有更好热稳定性。

目前发射波长为 650 nm 的红光 RCLED 在塑料光纤(POF)通信领域已经拥有广阔的市场, 并且在照明等领域也已经具备良好的应用价值。随着国际市场的发展, RCLED 的主要用途已不仅仅局限在红光 650 nm 波段的通信光源。GaN 材料凭借着优秀的物理化学性质以及高辐射复合效率, 使 GaN 基蓝光共振腔发光二极管(RCLED)在高亮度无斑点照明、显示、光纤通讯和医学美容等许多领域具有巨大的潜在价值。凭借着这些优势, 紫光、甚至紫外波段的 RCLED 研究也引起广泛的研究兴趣, 可以应用于工业, 医疗等领域。

近年来, 有许多科研人员对 GaN 基蓝光 RCLED 和近紫外 RCLED 进行了深入的研究。到目前为止, 出现了许多关于 GaN 基 RCLED 谐振腔的设计, 布拉格反射镜的制备, 电流限制结构[4] [5], 以及显示处

理技术等各方面的报道,并且研究还在继续。在此对近年 GaN 基 RCLED 有关发展进行归类,总结与探讨。

2. RCLED 的原理

1946 年, Purcell 预言了辐射源所处的电磁环境能改变其自发辐射特性。将辐射源置于尺寸在波长量级的腔中, 则其在腔谐振模式处的自发辐射得到增强, 反之会受到抑制[6]。

谐振腔发光二极管(RCLED)又被称为微腔发光二极管(Microcavity Light-emitting Diode, MCLED), 这个概念在 1992 年被贝尔实验室的 Schubert 等人首次提出[7]。他们根据 Fabry-Ferot(F-P)腔理论提出了一种新型 LED 结构——共振腔发光二极管(RCLED)。如图 1 所示, 发光介质的折射率为 n_s , 上下各层 DBR 的折射率分别为 n_{s+1}, n_{s+2}, \dots , 周围环境折射率为 n_{ext} , 发光层的厚度为 d 。顶部 DBR 对的反射系数为 r_1 , 底部 DBR 对的反射系数为 r_2 , 为了保证光出射, 要求 $r_1 < r_2$ 。光沿着腔光轴的传播在经过多次振荡后就脱离了谐振腔, 主要从顶部(折微腔通过干涉效应改变自发辐射的能量分布使光在腔中形成共振。由于光束在腔内多次来回反射, 极少频率的光满足干涉相长条件, 光强得到增加, 频率得到筛选, 特别是在共振腔的轴线方向, 可以形成光强最强、模式数目最少的光振荡, 从而达到可选择性出光的目的。同时, 由于干涉效应改变了自发辐射光子的优先传播方向, 因而改变了器件内部辐射中心的角功率分布, 使更多的光进入辐射立体角内, 器件的耦合效率得到提高, F-P 微腔改变了微腔中的有效模式密度, 当腔长减小时, 总的模式密度迅速增大, 并大大超过自由空间下的模式密度, 而模式密度增加的直接结果是光学微腔内工作物质的自发发射速率大大提高自发辐射速率。由费米黄金定律, 辐射增强因子由式给出:

$$Ge = \frac{\zeta}{2} \frac{(1 + \sqrt{R_2})^2 (1 - R_1) \tau_{cav}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 \tau} \quad (1)$$

其中, ζ 为驻波波腹增强因子, 在有源层放置恰当时一般为 2, τ 和 τ_{cav} 分别为无腔时的自发辐射寿命和有腔时的辐射寿命。图 2 为 RCLED 与传统 LED 在提取效率上的对比。

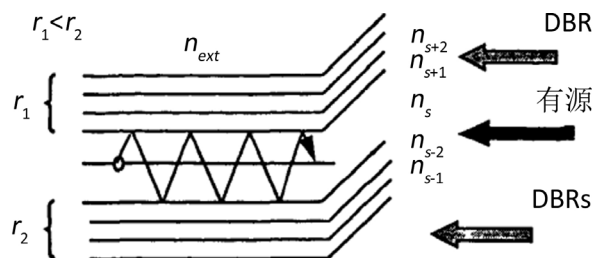


Figure 1. The basic diagram of RCLED
图 1. RCLED 的基本原理图

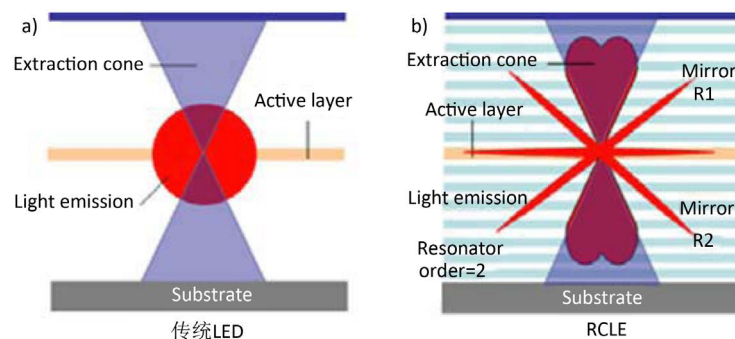


Figure 2. Comparison of extraction efficiency between common LED and RCLED
图 2. 传统 LED 与 RCLED 提取效率对比图

采用微腔结构实现了器件发光强度的增强、光谱纯度的提高、方向性的优化以及内量子效率的提升等一系列腔量子电动力学效应[8] [9]。

3. RCLED 的基本结构

3.1. RCLED 的基本结构

RCLED 的基本结构类似于 VCSEL，具体结构因不同发光波段所选用的材料及工艺而存在差异。

为了提高 LED 的出光功率，J.H.Son 等人曾通过使用光子晶体或表面纹理等方法[10] [11]，实现了出光效率的提升。此外，将发射层放置在 F-P (Fabry-Perot)腔中使光子优先传播方向被限制在锥形提取范围内，利用微腔效应所制成的 RCLED，大大提高了出光方向性，光功率以及调制带宽。

RCLED 结构中，有源层置于 F-P (Fabry-perot Cavity)光学谐振腔中，使自发发射的光在腔中发生干涉，抑制非共振波长，使出射光的光得到筛选。F-P 光学谐振腔是由上、下两部分分布式布拉格反射镜 (Distributed Bragg Reflector, DBR)组成的腔体，如图 1 所示。有源区介质的折射率为 n_s ，上、下两部分多对 DBR 的折射率分别为 n_{s+1} ， n_{s+2}周围环境折射率为 n_{ext} 。有源区介质的厚度为 d ，顶部 DBR 对的反射系数为 r_1 ，底部 DBR 对的反射系数为 r_2 ，由于光从顶部发射，要求 $r_1 < r_2$ 。

器件的外延生长，首先需要根据发光波长来决定它所对应的衬底、量子阱、DBR 材料等。由于每种材料都具有不同的物理化学性质，需要根据材料性质来确定最佳外延生长条件、选择最优后期制备工艺，因此制备出的不同波段的 RCLED 其内外结构上存在很大差异。主要针对红橙光和蓝紫光结构分别进行介绍。

3.2. 红、橙光 RCLED 设计原理与基本结构

红、橙光发光材料先后经历了发光效率不高的混合带隙 GaAsP 材料、高亮度的直接带隙材料 AlGaAs 和更高亮度的直接带隙材料 AlGaInP 时代。二十世纪 90 年代初，实现了利用晶格匹配的 GaAs 衬底上生长出直接带隙的 AlGaInP 材料，高性能的红、橙、黄发光器件取得了很大进展。此后，以谐振腔技术为基础的共振腔发光二极管(RCLED)的研制成为了提高红光 LED 提取效率的一种突破性方法。1989 年 Dallesasse 和 Holonyak 发现了控制 $Al_xGa_{1-x}As$ 材料的方法，使得这项技术成为最常用的一种红光波段 III-V 族化合物半导体 VCSELs 制造技术。大多数结 VCSEL 构的 RCLED 也开始采用氧化 $Al_xGa_{1-x}As$ 的方法来限制电流的和光子的运动。采用 AlGaAs/AlAs 或 AlGaInP/AlInP 作为上下两个分布布拉格发射镜(DBR)，与有源区一起形成三明治结构组成谐振腔，其原理图如下(图 3)。

3.3. 蓝、紫光 RCLED 设计原理与基本结构

GaN 基蓝光 RCLED 与 GaAs 基红光 RCLED 在设计原理与结构上存在很大区别。传统用于制备蓝光 RCLED 分布布拉格反射镜(DBR)的半导体材料 AlGaAs/GaN 之间存在晶格失配和热失配问题，难以获得表面平整且反射率 99% 以上的 DBR。为了满足需求，人们利用到键合技术和激光剥离技术，制备出高反射率的介质膜 DBR (dielectric DBRs)避免材料失配的问题。由于介质膜 DBR 和衬底材料具有极低的电导率，无法从器件上下两侧导通电流，为了能在施加电压后获得导通的电流，使 pn 结内电子运动到量子阱有源区发生自发辐射产生光子，工艺上需要将 n 型与 p 型电极安置在器件同一侧。除此之外，传统红光 RCLED 领域运用成熟的含 Al 材料氧化限制工艺限制电流结构也不再适用，对于蓝、紫光 RCLED，需要离子注入、等离子体处理等新方式形成电流限制层(Current Blocking Layer, CBL)。原理图如下(图 4)。

蓝光 RCLED 通常以蓝宝石材料为衬底，采用与 VCSEL 类似的垂直生长工艺结构，量子阱有源区的上下两侧分别为较低(50%~70%)和较高(>99%)反射率的 DBR，形成平面型谐振腔。通过对电极施加正向

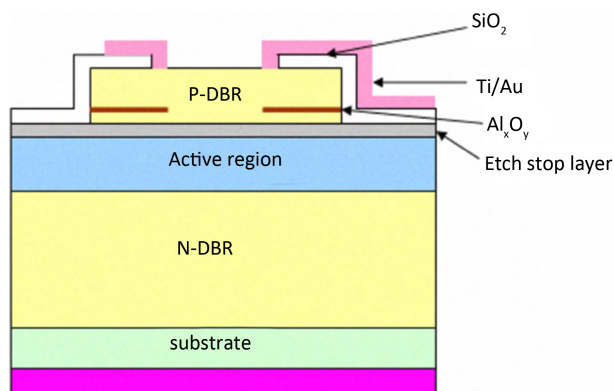


Figure 3. The structure of red RCLED

图 3. 红光 RCLED 基本结构示意图

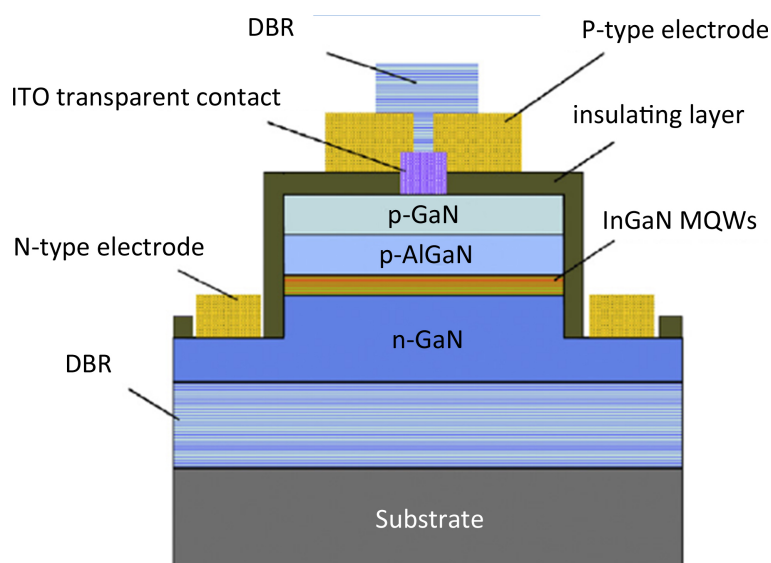


Figure 4. The structure of blue light RCLED

图 4. 蓝光 RCLED 基本结构示意图

偏压,使载流子从pn结运动到量子阱有源区当中自发发射产生光子,经谐振腔的振荡放大和波长筛选等作用后产生更多光子,并从反射率较低的上DBR发射出光。

4. 发展概况

随着RCLED器件设计和制作工艺水平上的不断进步,使得蓝紫光RCLED在发光功率、结构优化、传输速率,品质因数、调制带宽等方面大幅提升,目前已应用于民用数据通信系统。

4.1. 效率提升

2013年,日本小组选取 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 和 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 尺寸的455 nm波长GaN基RCLED和普通LED,在15 mA电流下进行测试比较,获得RCLED的出光功率比普通LED分别提高了95.26%和127.36%;普通LED的提取效率为6.57%,RCLED最高可达到9.73%。远场分布方面,RCLED的远场半宽可达到 $\pm 51^\circ(\pm 47^\circ)$,图5为实验RCLED与普通LED的功率对比图[12]。

另外,利用在RCLED上制备光子晶体(PhC)的方法,可使功率大大提高。曾有报道制作出输出光功

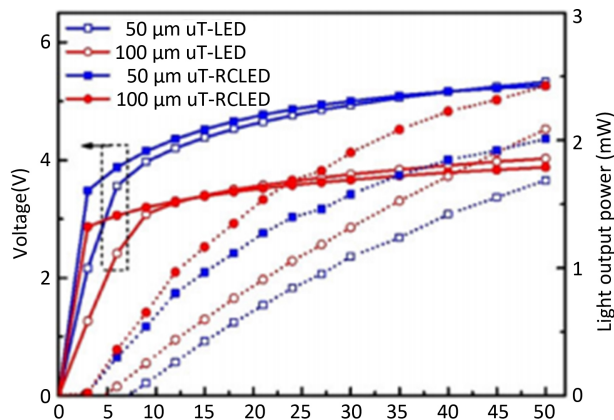


Figure 5. P-I-V characteristic curve of 50 μm/100μm size with RCLED and LED

图 5. 50 μm/100μm 尺寸 RCLED 与普通 LED 的 P-I-V 特性曲线

率是普通 Ga 基 RCLED 2.48 倍，远场半宽接近 17° 的 GaN 基 RCLED [13]。

4.2. 波段拓宽

4.2.1. 绿光波段 RCLED

GaN 基绿光 RCLED 凭借着光谱纯度高，方向性好以及提取效率高等优势，广泛应用于家庭网络用塑料光纤(POF)光源，日本公司在 Si 衬底上生长 GaN 基绿光 RCLED 已有报道，其光输出和半峰全宽(FWHM)相比普通 LED 均有大幅度增强。此外，还有针对蓝宝石、Cu 等不同衬底的绿光 RCLED 相关研究。

4.2.2. 近紫外波段 RCLED

常用光源中，III 族氮化物基的蓝光和绿光 LED 已经发展成熟，但在 400 nm 以及深紫外波段仍处于探索阶段。380~400 nm 的 RCLED 在工业，医疗领域应用非常有吸引力。如光催化、影印技术，光纤光源，皮肤癌和光化性角化病的治疗、荧光内镜光动力疗法，荧光微阵列和显微镜等。传统近紫外 LED 由于 GaN 的高折射率(约为 2.5)，在 InGaN/GaN 量子阱产生的光在 GaN 与空气表面完全反射回内部，限制了光的输出。随着激光剥离蓝宝石衬底技术的发展，制作出 InGaN 量子阱 RCLED 能够具有高光腔品质因数 Q，更好的出光方向性以及更大的光功率等优点[14] [15] [16]。除了薄膜制造工艺以外，InGaN 材料 RCLED 也可通过外延生长高反射率的 AlGaIn/GaN DBR 反射镜[17] [18]，利用 Ta₂O₅ 作为反射镜，具有化学性能和热性能稳定，高折射率和光谱范围宽的优点，透射光谱范围涵盖 300~820 nm [19] (图 6)。

20 世纪初曾经报道过 510 nm 和 460 nm 塑料光纤用 RCLED，[21] [22]，Diagne 等人用应变 GaN/AlGaIn，高反射率的分布布拉格反射镜(DBR)组成的光腔制作出 413 nm 波长 RCLED [23]。2013 年，T. Moudakir 等人用 III 族氮化物应变制做出含 20 对 AlGaIn/GaN 底部 DBR，发射波长为 390 nm 的 RCLED [3]。

2016 年，Chia-Lung Tsai 等人利用 GaN 作为衬底，InGaIn 材料为有源层，Ta₂O₅/SiO₂ 介质作为上 DBR 制成的近紫外 RCLED 在 150 mA 下得到的光功率比普通 LED 高 21.1%，外量子效率达到 8.5% [20]。

2017 年，Yuh-Shiuan Liu 等人通过离子注入的方式来限制紫外波段 RCLED，制备出的器件在 15 kA/cm² 电流下的发射波长为 371.4 nm，光谱宽度为 5.1 nm [24]，图 7 是实验器件测量的 EL 光谱。

4.3. 器件结构发展

4.3.1. 电流限制结构

在传统的 VCSELs 中，电流孔径对器件特性起着至关重要的作用。没有良好的电流孔径来限制载流

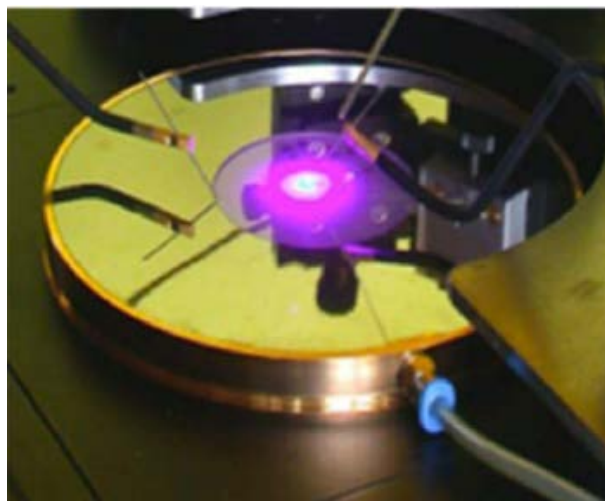


Figure 6. RCLED device with luminous wavelength of 390 nm

图 6. 390 nm 紫外 RCLED 器件实物图

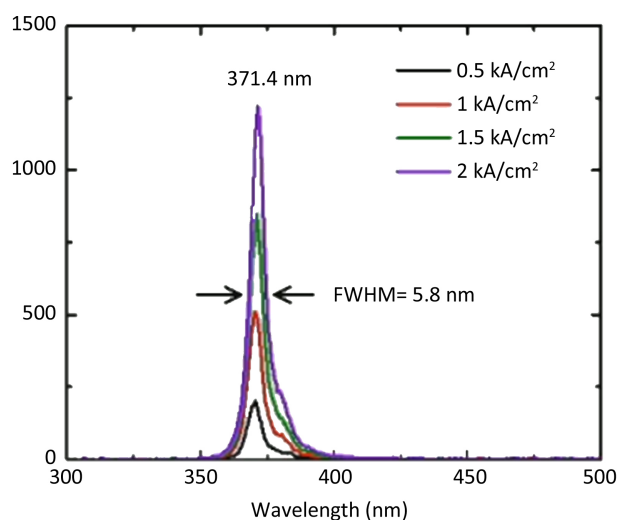


Figure 7. EL spectrum of 370 nm RCLED

图 7. 370 nm 波长紫外 RCLED 的 EL 光谱

子在两 DBR 之间产生光子, 就无法保证低阈值电流和单一模式。自从 1989 年 Dallesasse 和 Holonyak 发现了控制 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的方法, 大多数 VCSEL 结构的 VCSEL 开始采用氧化 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 作为限制电流和光子, 使得这项技术成为最常用的一种传统 III-V 族化合物红外波段半导体 VCSELs 制造技术。然而, 对于在近紫外波段或蓝绿色波长范围内的发光器件, 由于 DBR 材料不同, 氧化铝的方式不再可行。该领域人员开始对各种电流限制的技术进行了研究, 如埋 AlN 选择区域生长法, AlInN 氧化法, 受体选择性激活法等。

对于生长在绝缘蓝宝石衬底上的 GaN 基 RCLED, 横向电流经常会导致电流拥挤效应[25], 用铟锡氧化物(ITO)作为电流扩展层可以让电流延横向均匀扩散[26], 但改变垂直结构要运用复杂的原片转移技术来去除蓝宝石衬底, 需要精确控制原片厚度达到谐振效应。更简洁的办法是制作更小的电流限制结构。目前电流限制层(CBLs)主要包括: 氧化硅/氮化硅绝缘层、台面刻蚀工艺、离子注入、肖特基势垒以及通过选择性氧化或等离子体处理形成高电阻区域等方式。2014 年, 台湾科技大学台湾科技大学光电工程研究所利用 Si 扩散限制结构工艺, 制作出 5 μm 的电流限制结构[27], 如图 8 所示。

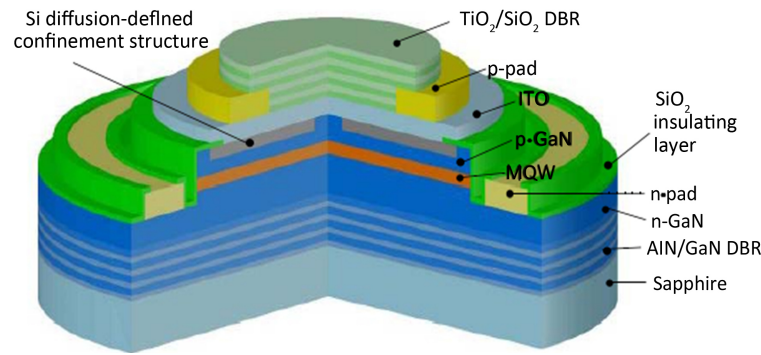


Figure 8. Three dimensional profile of silicon diffusion-defined confinement structure RCLED

图 8. 硅扩散型限制结构 RCLED 的三维立体剖面图

4.3.2. 反射镜(DBR)

对于发光器件, 氮化物 DBR 在 RCLED 和 VCSEL 中扮演者重要角色。两种器件都要求具有高反射率的分布布拉格反射镜(DBR), 对于 VCSEL, 谐振腔上下的 DBR 都需要高反射率 DBR; 而对于 RCLED, 高反射率的 DBR 能增强光功率和发射光谱。之前有许多利用分子束外延(MBE)和金属有机物化学气相外延(MOCVD)生长 GaN/AlGaIn 和 AlInN/GaN 材料 DBR 结构的报道[28] [29], 然而由于 GaN 与 AlGaIn、AlInN 的折射率差很低, 需要许多对 DBR 来达到反射率要求。这些氮化物 DBR 生长在蓝宝石衬底上, 线密度位错将高达 $10^8 \sim 10^{10}/\text{cm}^2$, 在 DBR 对数达到 40 对后, 晶体质量严重下降。因此, 下 DBR 的质量将直接影响谐振腔和上 DBR 的好坏程度。AlN/GaN 具有很高的折射率差($\Delta n/n = 0.20$), 可通过较少的对数获得较大的反射率。Ng *et al.* 等人最早利用 25.5 对 AlN/GaN DBR 在 467 nm 反射峰处的反射率达到 99% [30]。利用 20 对 AlN/GaN 基 DBR 和三个超晶格结构得到在 399 nm 处反射率为 97%, 禁带宽度为 14 nm 的 RCLED [31]。

经过不断发展, 目前 GaN 基 RCLED 按所采用的 DBR 结构可以分为以下两种类型: 混合腔结构 VCSEL 和全介质膜结构 VCSEL。混合腔结构 VCSEL 底部采用氮化物 DBR, 在生长氮化物 DBR 时由于组成 DBR 的两种材料之间具有较大的晶格失配和热失配, 因此很难获得高质量的氮化物外延层; 全介质膜结构 VCSEL 上下采用两个介质膜 DBR, 可以避开制作高质量氮化物 DBR 的困难。

TiO₂ 是一种新型介质 DBR 材料, 相比于传统 DBR, 它具有较高的反射率带宽、可设置波长、横模控制和偏振选择等诸多优点。在光栅材料选择上, 由于 TiO₂ 具有良好的光学、化学和机械特性, 如较高的折射率, 在超过 400 nm 波长范围其吸收损耗可忽略不计, 化学蚀刻选择性非常高, 薄膜中的残余机械应力可控等优点。

2015 年, Ehsan Hashemi 等人成功制备悬空 TiO₂ 基高折射率亚波长光栅反射镜(HCG)。实验通过材料淀基等技术, 制备出悬空 TiO₂ 基高折射率亚波长光栅反射镜(HCG)作为蓝光 VCSEL 的上反射镜, 产生了未弯曲的理想矩形光束。峰值波长的反射率达到 95%, 对 TM 偏振有较大的反射带宽(FWHM 为 80 nm), 如图 9 所示[16]。

2016 年, 台湾科技大学光电工程研究所通过将上 DBR 反射率减少至 50% 来增加 GaN 基蓝光 RCLED 输出光功率。在室温下, 20 μm 出光孔径的器件在注入电流为 25.2 mA 时功率达到 0.53 mW CW; 在有 DBR 情况下, 半峰全宽 FWHM 从 20 nm 降至 3.5~4.5 nm; 峰值波长为 428 nm, 随温度的红移量为 0.03 nm/°C [24]。

4.4. 品质因数

利用衬底两部转移法制备 GaN 基 RCLED。通过将 30 nm 的 ITO 层生长到电场的波节位置使, 以及

利用 CMP 技术将布满缺陷的 GaN 衬底层移除并剖光表面, 实验结果品质因数达到 2170, 并证明高品质因数下能得到更低的损耗以及更高的光输出[16]。

利用高反射率的 AlN/GaN 材料作为下 DBR, $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 作为上 DBR, 获得品质因数 Q 为 895 的 RCLED, 相比普通 LED 20 nm 光谱宽度, RCLED 的光谱宽度可达到 0.5 nm [32], 其结构如图 10 所示。

台湾的小组通过减小 ITO 的厚度, 证明了 ITO 对光吸收的重要性[33], 另一方面, 量子阱吸收主要是由于载流子分布不均匀所造成[17] [34] [35] [36]。据研究表明, GaN 基 LED 中存在的载流子分布不均匀, 尤其量子阱中远离在 p-GaN 的位置空穴浓度很低[20] [37]这是导致大电流下 LED 效率骤降的原因之一。在垂直腔结构器件中由于需要更大的注入电流, 这个效应会更加明显。

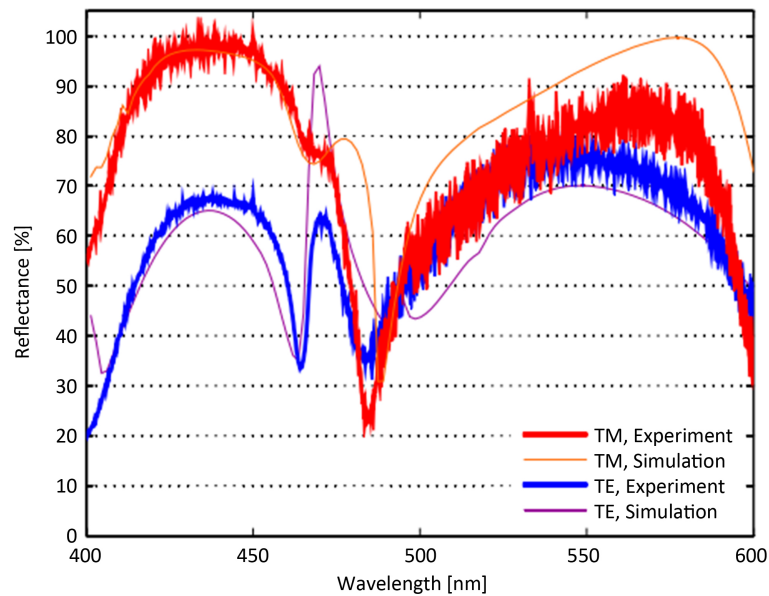


Figure 9. Measurements and simulation results of TE/TM mode reflectance spectra of TiO_2 high reflectivity gratings (HCGs)

图 9. TiO_2 高反射率光栅(HCGs)TE/TM 模反射光谱的测量和模拟结果图

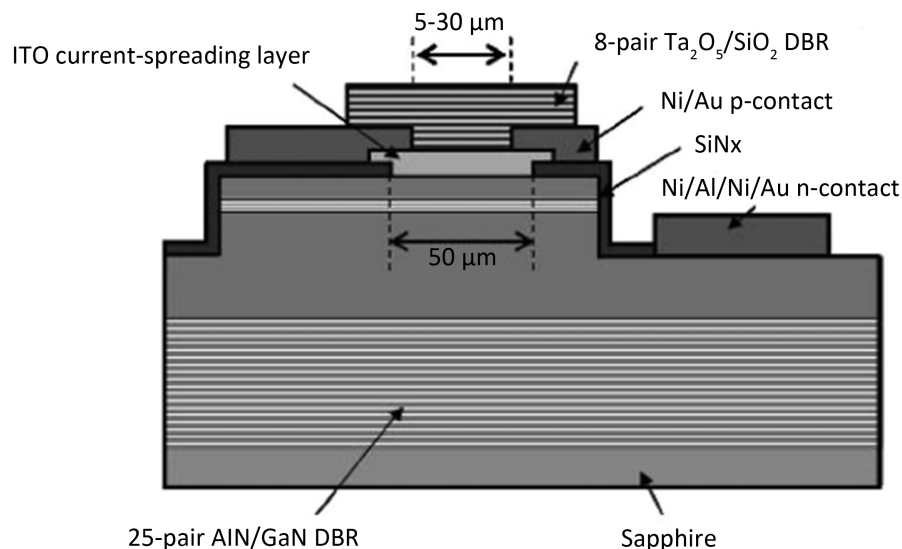


Figure 10. GaN based RCLED with $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ top DBR

图 10. GaN 基 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 介质 DBR 结构 RCLED

4.5. 传输速率

近年来 GaN 基 RCLED 的传输速率正在不断提升。商用蓝绿光 RCLED 塑料光纤已达到 250 Mb/s 的速率[38], 充分体现 RCLED 在短距离光纤通信领域和数据传输上的应用价值。在室内无线传输方面, 与射频链路相比 LED 基可见光传输具有系统功耗低, 抗电磁干扰, 网络安全, 带宽高且不受限制等诸多优点。Chun *et al.*等人利用正交频分复用技术, 将 GaN 基蓝光 LED 和黄色荧光灯相结合实现了 1.68 Gb/s 的白光无线传输[39]。

2015 年, Wang *et al.*报道了三基色 LED 为基础的波分复用通信系统, 在 1.5 m 室内数据传输速度超过 4.5 Gb/s。2016 年, Chia-Lung Tsai 等人通过制备组合成白光 RCLED 实现了短距离范围内(~100 cm)速率为 150 Mb/s 的数字电视信号传输, 图 11 接收到的数字电视信号。2017 年, GaN 基紫光微型 LED 实现 10 Gb/s 的正交频分复用可见光通信[40], 这将为 RCLED 的进一步发展提供了新思路。

塑料光纤(Plastic Optical Fiber, POF)在光纤通讯领域中具有巨大商业价值。相比于玻璃纤维, 它具有成本低、安装方便和恢复力强等优点。凭借着速率上的提升, RCLED 在 POF 通讯中也有更广泛的应用。(表 1, 表 2)红光 LED 已经成为一个在 100 米范围内 POF 传输中, 低成本、较简便的家庭网络应用的良好选择, 表 1 列出了当前世界先进 POF 常用光源的性能以及相关研究; 绿光 RCLED 在较大的距离(≥ 100)光纤传输上具有更好的表现[37]。

在聚合物光纤(POF)传输系统中, RCLED 中的非线性传输部分会对整体的传输性能产生极大影响。为了消除非线性失真以增强 POF 的传输性能, 可对非线性区域进行信号补偿。2014 年 Miao, P.等人用预失真器数字查找表(LUT)的方法, 对 RCLED 的非线性区域进行补偿[41], 使性能提升至少 10dB。在此基础上, 该小组在 2016 年成功对 SI-POF 内 DMT 调制的 RCLED 进行优化和非线性补偿, 使收敛时间大幅降低[42]。此外, 采用功率回退法, 减小峰值-平均输出功率(PAPR), 迭代信号裁剪技术等方式, 也能使

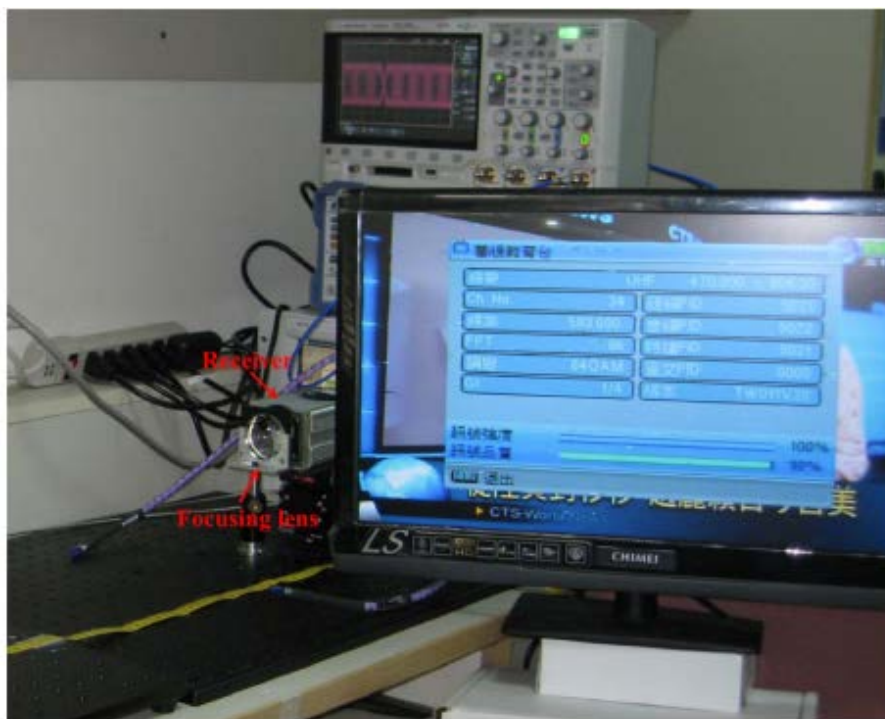


Figure 11. TV image received from a directed line-of-sight optical link with white RCLEDs
图 11. 接收到白光 RCLED 所传输的数字电视信号

Table 1. The performance and research of POF light source**表 1.** POF 常用光源的性能及研究

S.no	Fiber Type	Source	Data Rate	Length	Year and Ref	Remarks
1	SI-POF	GaAs VCSEL	2.5 Gbps	2.5 m	1999 [3]	Short Distance Ethernet Application
2	GI-POF	Red RCLED	500 Mbps	50 m	2001 [4]	Applications in Digital TV
3	GI-POF	VCSEL	5 Gbps	50 m	2011 [5]	Discrete Tone Modulation, Application in Data Centers
4	SI-POF	Red RCLED	300 Mbps	50 m	2011 [6]	CAP modulation, Passive Equalization
5	SI-POF	Red Laser	1.25 Gbps	50 m	2012 [7]	High Speed Intra Home Networking Applications
6	SI-POF	Red RCLED	622 Mbps	30 m	2014 [8]	Home Networking Applications
7	SI-POF	Red LED	50 Mbps	10 m	2016 [This work]	4-PAM modulation, Home Networking Application
8	SI-POF	Red LED	≤100 Mbps	≤100 m	2016 [This work]	2-PAM, Home Networking Application

Table 2. Parameters of sources, POF, and PIN Diodes used**表 2.** POF 和 PIN 二极管所用光源其它性能参数

Source	Red LED	Red RCLED	Red Laser	Green RCLED
Modules	HFBR-1527Z	FT01MVNR	GL PT-6.0	FT05MHNG
Wavelength (nm)	650	650	650	530
Diameter (mm)	1	1	1	1
Distance Covered (m)	≤100	100	100	100
Far- Field angle [9]	60°	10°	20°	10°
Optical Rise Time (ns)	2.1	9	1	9
Optical Fall Time(ns)	2.8	3	1.5	3
Spectral Width (nm)	21	11	2	18
Operating Current (mA)	19	20~25	≥35	20~25
Power Output	-10 dBm	-3 dBm	2~5 mW	-3 dBm
Operating Temperature(°C)	-40 to 90	-40 to 85	-10 to 36	-40 to 85
Eye Safe	Yes	Yes	Unsafe	Yes
POF	Core Diameter	Attenuation	NA	Bandwidth.km(MHz.Km)
HFBR RNS010Z	SI 1 mm	0.22 dB/m @ 650 nm	0.46	10
PIN Photo-diode +TIA	Dark Current	Responsivity	Peak Input Optical Power	
HFBR-25X6Z	4 nA	6.5 V/W	-5.8 dBm	
FR05MHIR	2 nA	8 V/W	-30 dBm	
IFD98	2.5 nA	5 V/W	-7.3 dBm	

非线性得到改善[39] [40]。

5. 总结

介绍了 RCLED 的原理与基本结构，并根据产生红蓝波长器件的材料不同，分别阐述设计原理和制作工艺上的关键问题。重点介绍了 GaN 基 RCLED 近年的发展成果，尤其是在蓝紫光波段，随着 RCLED 器件设计和制作工艺水平上的不断进步，使得蓝紫光 RCLED 在发光功率、结构优化、传输速率，品质

因数、调制带宽等方面大幅提升,目前已应用于民用数据通信系统。在此基础上,还需继续进一步的研究,使其能够达到更大的提取效率来增加出光功率,具有更小的光谱宽度来提升传输速率,以及拓宽波长范围等其它性能上的突破。这样能够使 GaN 基 RCLED 在照明显示和光纤传输领域具有更出色的性能,在未来的发展中具有更加广阔的市场应用。

参考文献 (References)

- [1] Schubert, E.F., Wang, Y.-H., Cho, A.Y., Tu, L.-W. and Zydzik, G.J. (1992) Resonant Cavity Light-Emitting Diode. *Applied Physics Letters*, **60**, 921-923. <https://doi.org/10.1063/1.106489>
- [2] Fiedler, A., Rehdorf, J., Hilbers, F., Johrdan, L., Stribl, C. and Benecke, M. (2008) Detection of Semen (Human and Boar) and Saliva on Fabrics by a Very High Powered UV-/VIS-Light Source. *The Open Forensic Science Journal*, **1**, 12-15. <https://doi.org/10.2174/1874402800801010012>
- [3] Moudakir, T., *et al.* (2013) Design, Fabrication, and Characterization of Near-Milliwatt-Power RCLEDs Emitting at 390 nm. *IEEE Photonics Journal*, **5**, Article ID: 8400709.
- [4] Purcell, E.M. (1946) Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Solid. *Physical Review*, **69**, 681. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.69.37>
- [5] Ying, L.Y. and Hu, X.L. (2015) Control of Optical Loss InGaN-Based Planar Cavities. *Superlattices and Microstructures*, **88**, 561-566. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.10.020>
- [6] Hashemi, E. and Bengtsson, J. (2015) Air-Suspended TiO₂-Based HCG Reflectors for Visible Spectral Range. *SPIE OPTO*, San Francisco.
- [7] 杨臻, 李建军. 可见光共振腔发光二极管原理及发展概况[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 25-29.
- [8] Schubert, E.F., Wang, Y.H., Cho, A.Y., *et al.* (1992) Resonantcavity Light-Emitting Diode. *Applied Physics Letters*, **60**, 921-923. <https://doi.org/10.1063/1.106489>
- [9] Ma, F.Y., Liu, X.Y., Zhang, C.Y., Li, H.B. and Wang, L.J. (2006) Design and Fabrication of Pure Green Color Micro-cavity Organic Light Emitting Device. *Japanese Journal of Applied Physics*, **45**, 9224. <https://doi.org/10.1143/JJAP.45.9224>
- [10] 徐登. 有机盐掺杂聚合物微腔的受激发射特性研究[J]. 物理学报, 2009, 58(4): 2781-2784.
- [11] Fujii, T., Gao, Y., Sharma, R., Hu, E.L., Den Baars, S.P. and Nakamura, S. (2004) Increase in the Extraction Efficiency of Ga N-Based light-Emitting Diodes via Surface Roughening. *Applied Physics Letters*, **84**, 855-857. <https://doi.org/10.1063/1.1645992>
- [12] Son, J.H. and Lee, J.-L. (2011) Enhancement of External Quantum Efficiency InGaN Based LEDs. *Proceedings of SPIE*, **7939**, 79391D-1-79391D-12. <https://doi.org/10.1117/12.877041>
- [13] Chu, Y.-C. and Su, Y.-K. (2013) Size-Dependent Resonant Cavity Light-Emitting Diodes for Collimating Concerns. *Japanese Journal of Applied Physics*, **52**, 01AG03.
- [14] Horng, R.-H., Wang, W.-K., Huang, S.-Y. and Wu, D.-S. (2006) Effect of Resonant Cavity in Wafer-Bonded Green InGaN LED with Dielectric and Silver Mirrors. *IEEE Photonics Technology Letters*, **18**, 457-459. <https://doi.org/10.1109/LPT.2005.863177>
- [15] Bergenek, K., *et al.* (2009) Beam-Shaping Properties of InGaN Thin-Film Micro-Cavity Light-Emitting Diodes with Photonic Crystals. *Proceedings of SPIE*, **7231**, 2310C-1-2310C-11. <https://doi.org/10.1117/12.807617>
- [16] Hu, X.-L., *et al.* (2012) Fabrication and Characterization of High-Quality Factor GaN-Based Resonant-Cavity Blue Light-Emitting Diodes. *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, 1472-1474. <https://doi.org/10.1109/LPT.2012.2206110>
- [17] Corbett, B., *et al.* (2003) Red and Green Resonant Cavity LEDs for Datacom Applications. *Proceedings of SPIE*, **4876**, 176-183. <https://doi.org/10.1117/12.463713>
- [18] Huang, G.S., Lu, T.C., Kuo, H.C., Wang, S.C. and Chen, H.-G. (2007) Fabrication of Microcavity Light-Emitting Diodes using Highly Reflective AlN-GaN and Ta₂O₅-SiO₂ Distributed Bragg Mirrors. *IEEE Photonics Technology Letters*, **19**, 999-1001. <https://doi.org/10.1109/LPT.2007.898763>
- [19] Zhang, D.-X., *et al.* (2012) Thickness-Dependence of Optical Constants for Ta₂O₅ Ultrathin Films. *Applied Physics A*, **108**, 975-979. <https://doi.org/10.1007/s00339-012-7007-2>
- [20] Tsai, C.-L. (2016) Resonant-Cavity Light-Emitting Diodes (RCLEDs) Made from a Simple Dielectric Coating of Transistor Outline (TO)-Can Packaged in GaN LEDs for Visible Light Communications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **63**.

- [21] Maaskant, P., Akhter, M., Roycroft, B., Carroll, E.O. and Corbett, B. (2002) Fabrication of GaN-Based Resonant Cavity LEDs. *Physica Status Solidi*, **192**, 348-353. [https://doi.org/10.1002/1521-396X\(200208\)192:2<348::AID-PSSA348>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1521-396X(200208)192:2<348::AID-PSSA348>3.0.CO;2-6)
- [22] Lu, T., Kao, T., Kao, C., Chu, J., Yeh, K., Lin, L., Peng, Y., Huang, H.-W., Kuo, H.-C. and Wang, S.-C. (2007) Ga N-Based High-Q Vertical-Cavity Light-Emitting Diodes. *IEEE Electron Device Letters*, **28**, 884-886. <https://doi.org/10.1109/LED.2007.904906>
- [23] Diagne, M., He, Y., Zhou, H., Makarona, E., Nurmikko, A.V., Han, J., Waldrip, K.E., Figiel, J.J., Takeuchi, T. and Krames, M. (2001) Vertical Cavity Violet Light Emitting Diode Incorporating an Aluminum Gallium Nitride Distributed Bragg Mirror and a Tunnel Junction. *Applied Physics Letters*, **79**, 3720-3722. <https://doi.org/10.1063/1.1415405>
- [24] Liu, Y.S. and Kao, T.-T. (2017) Ultraviolet Microcavity Light-Emitting Diode with Ion-Implanted Current Aperture. *SPIE OPTO*, San Francisco.
- [25] Schubert, E.F. (2006) Light-Emitting Diodes. Cambridge University Press, Cambridge, ch. 8. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546>
- [26] Song, Y.-K., Diagne, M., Zhou, H., Nurmikko, A.V., Schneider, R.P. and Takeuchi, T. (2000) Resonant-Cavity in GaN Quantum-Well Blue Light-Emitting Diodes. *Applied Physics Letters*, **77**, 1744-1746. <https://doi.org/10.1063/1.1310625>
- [27] Yeh, P.S. (2014) GaN-Based Resonant-Cavity LEDs Featuring a Si-Diffusion-Defined Current Blocking Layer. *IEEE Photonics Technology Letters*, **26**, 2488-2491.
- [28] Carlin, J.-F., Dorsaz, J., Feltin, E., Butté, R., Grandjean, N., Ilegems, M. and Lügt, M. (2005) Crack-Free Fully Epitaxial Nitride Microcavity using Highly Reflective AlInN/GaN Bragg Mirrors. *Applied Physics Letters*, **86**, Article ID: 031107.
- [29] Zhang, X.H., Chua, S.J., Liu, W., Wang, L.S., Yong, A.M. and Chow, C.Y. (2006) Crack-Free Fully Epitaxial Nitride Microcavity with AlGaIn/GaN Distributed Bragg Reflectors and in GaN/GaN Quantum Wells. *Applied Physics Letters*, **88**, Article ID: 191111.
- [30] Ng, H.N., Moustakas, T.D. and Chu, S.N.G. (2000) High Reflectivity and Broad Bandwidth AlN/GaN Distributed Bragg Reflectors Grown by Molecular-Beam Epitaxy. *Applied Physics Letters*, **76**, 2818-2820. <https://doi.org/10.1063/1.126483>
- [31] Yeh, P.S. and Chang, C.-C. (2016) Blue Resonant-Cavity Light-Emitting Diode with Half Milliwatt Output Power. *Proceedings of SPIE*, **9768**, 97680K.
- [32] Lu, T.C., Kao, C.C., Kuo, H.C., Huang, G.S. and Wang, S.C. (2008) CW Lasing of Current Injection Blue GaN-Based Vertical Cavity Surface Emitting Laser. *Applied Physics Letters*, **92**, Article ID: 141102. <https://doi.org/10.1063/1.2908034>
- [33] Ni, X., Fan, Q., Shimada, R., Özgür, Ü. and Morkoç, H. (2008) Reduction of Efficiency Droop in InGaIn Light Emitting Diodes by Coupled Quantum Wells. *Applied Physics Letters*, **93**, Article ID: 171113. <https://doi.org/10.1063/1.3012388>
- [34] Zhang, J.Y., Cai, L.E., Zhang, B.P., Hu, X.L., Jiang, F., Yu, J.Z. and Wang, Q.M. (2009) Efficient Hole Transport in Asymmetric Coupled InGaIn Multiple Quantum Wells. *Applied Physics Letters*, **95**, Article ID: 161110. <https://doi.org/10.1063/1.3254232>
- [35] Oh, H.S., Joo, J.H., Lee, J.H., Baek, J.H., Seo, J.W. and Kwak, J.S. (2008) Structural Optimization of High-Power Al-GaInP Resonant Cavity Light-Emitting Diodes for Visible Light Communications. *Japanese Journal of Applied Physics*, **47**, 6214-6216. <https://doi.org/10.1143/JJAP.47.6214>
- [36] Chun, H., *et al.* (2014) Visible Light Communication using a Blue GaN μ LED and Fluorescent Polymer Color Converter. *IEEE Photonics Technology Letters*, **26**, 2035-2038. <https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2345256>
- [37] Islim, M.S. (2017) Towards 10 Gb/s Orthogonal Frequency Division Multiplexing-Based Visible Light Communication using a GaN Violet Micro-LED. *Photonics Research*, Vol. 5, No. 2.
- [38] Miao, P., Wu, L. and Peng, L. (2014) RCLED Nonlinearity Mitigation for Polymer Optical Fiber Communications. *Proceedings of the 13th International Conference on Optical Communications and Networks*, Suzhou, 9-10 November 2014, 1-4.
- [39] Mesleh, R., Elgala, H. and Haas, H. (2012) LED Nonlinearity Mitigation Techniques in Optical Wireless OFDM Communication Systems. *Journal of Optical Communications and Networking*, **4**, 865-875. <https://doi.org/10.1364/JOCN.4.000865>
- [40] Dimitrov, S., Sinanovic, S. and Haas, H. (2012) Clipping Noise in OFDM-Based Optical Wireless Communication Systems. *IEEE Transactions on Communications*, **60**, 1072-1081. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2012.022712.100493>
- [41] Miao, P. and Wu, L. (2016) RCLED Optimization and Nonlinearity Compensation in a Polymer Optical Fiber DMT

System. *Applied Sciences*, **6**, 260. <https://doi.org/10.3390/app6090260>

- [42] Mittal, N., Shah, M. and John, J. (2016) A Low Cost Short Haul Plastic Optical Fiber Link For Home Networking Applications. *IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics Information Communication Technology*, 20-21 May 2016. <https://doi.org/10.1109/RTEICT.2016.7808212>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5450，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：oe@hanspub.org