

新型瞬态电真空半导体 光电子器件与技术

XINXING SHUNTAIDIAN ZHENKONG BANDAOTI
GUANGDIANZI QIJIAN YU JISHU

母一宁 等著

国防工业出版社

National Defense Industry Press

新型瞬态电真空半导体 光电子器件与技术

母一宁 刘春阳 陈卫军 宋 德 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书简要阐述近年来新型瞬态电真空半导体光电子器件内涵、特点、研究意义与国内外发展现状；对影响新型瞬态电真空半导体光电子器件总体设计方案的多种外界约束条件和性能指标进行分析；重点论述新型瞬态电真空半导体光电子器件总体情况与发展趋势，并论述了宽禁带紫外半导体激射原理，电真空光电倍增原理与复合探测机制，真空半导体电子倍增成像器件以及未来光电调制技术等。

本书可供从事空间光电技术领域的科技人员使用，也适合光学工程、通信工程等学科的高年级本科生、研究生和高等学校教师参考和阅读。

图书在版编目（CIP）数据

新型瞬态电真空半导体光电子器件与技术/母一宁等著. —北京：国防工业出版社，2018.12

ISBN 978-7-118-11811-7

I. ①新… II. ①母… III. ①半导体光电器件—真空微电子器件
IV. ①TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 299595 号

※

国防工业出版社出版发行

（北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048）

北京虎彩文化传播有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 5½ 字数 149 千字

2019 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 — 印数 1—500 册 定价 89.00 元

（本书如有印装错误，我社负责调换）

国防书店：（010）88540777

发行邮购：（010）88540776

发行传真：（010）88540755

发行业务：（010）88540717

前 言

电子在真空中的迁移率远远高于在固体中的迁移率，所以电真空半导体器件在宽带、高速、功率等方面有诸多优势，使其非常适用于雷达、激光测距、激光通信、微光成像等多个技术领域。经过 50 余年的快速发展，国内外先后出现了多种新型光电子器件，并在众多技术领域获得了重要的应用。此领域所取得的科研成就也促进和推动了相关技术和学科的快速发展，使瞬态电真空半导体光电子技术成为一门因信息社会需求而迅速发展的光电技术学科中的新兴交叉学科。

本书的写作主要建立在作者及所在科研团队长期从事光电子器件理论探索、项目研究与研究生教学基础上，对快速发展的光电子技术和复杂的电真空半导体理论体系调研、归纳、分析和总结，不仅突出瞬态电真空电子光学系统中的基本原理和关键技术，而且重点阐述电真空半导体的最新发展趋势。本书不仅可以直接面向从事光电系统研发的科技人员，而且可为通信工程、光电工程及其相近专业的高年级本科生或研究生提供参考。

全书共分为 5 章。第 1 章为概论，主要阐述瞬态电真空半导体光电子器件内涵、特点、研究意义与国内外发展现状，使读者对瞬态电真空半导体光电子技术有一个宏观和大致了解；第 2 章以紫外激光器件为例论述半导体激光器件瞬时激光机理；第 3 章以微通道光电倍增机构为例，重点论述了电子光学复合探测机理；第 4 章以 EBAPS 为例着重论述了电真空半导体器件的瞬态特性与成像机理；第 5 章以艾丽光束的非线性调制为例，详细论述了未来瞬态光电子器件的发展趋势。

本书由长春理工大学“吉林省瞬态光学与光电子器件创新团队”全体科研人员集体创作而成。本书由母一宁、刘春阳、陈卫军、宋德

撰写；校内的端木庆铎教授、李野教授提出了宝贵的意见和建议；在文字录入、图表绘制和计算机仿真等工作中得到了鞠莹、曹喆、刘德兴、刘永、樊海波、朱焱等同学的大力协助；在此，编著者向他（她）们表示衷心的感谢。本书编著过程中得到许多同行专家和教授们的热情鼓励与支持，在此表示最诚挚的谢意。光电子器件涉及材料、电子、非线性光学等多学科领域的基础理论和专业知识，而且发展日新月异，由于作者学识有限，书中不妥之处，敬请广大读者提出宝贵意见。

作者

2018年10月于长春

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	光电子器件的瞬态	1
1.2	半导体紫外光发射器研究现状与进展	1
1.3	真空半导体器件瞬态优势与艾里光束的非线性瞬态调制技术	8
第 2 章	宽禁带半导体电光器件瞬时激射	12
2.1	异质结器件电瞬时发光机理	12
2.2	异质结薄膜的 MIS 结紫外光发射器件	22
2.2.1	波长调控机理	22
2.2.2	器件制备流程与工艺	23
2.2.3	异质结薄膜 MIS 结制备	26
2.2.4	MIS 结光发射器件的电泵浦随机激光	28
2.3	波长可调的紫外电致发光和随机激光	33
2.3.1	MIS 结光发射器件的制备	33
2.3.2	波长可调的电致发光和随机激光	34
2.3.3	电致发光机制与讨论	36
2.4	MIS 结激光二极管的瞬态技术	40
2.4.1	纳米线阵列的水热合成与物性	40
2.4.2	纳米线性能提升	42
2.4.3	纳米线的光学和电学输运性质	45
2.4.4	纳米线的电泵浦受激发射和机制	48
2.5	本章小结	55
第 3 章	电真空光电倍增与复合探测原理	57
3.1	电真空光电倍增器件复合探测的应用背景与原理	57

3.1.1	复合探测的应用背景	57
3.1.2	复合探测原理	61
3.2	微通道空间波导阳极复合探测器件	63
3.2.1	复合波导阳极结构与工作原理	63
3.2.2	复合波导阳极设计原理与特性	67
3.3	器件级电子光学系统设计、工艺与验证	70
3.3.1	器件级工艺与实现	70
3.3.2	复合探测原理性验证	76
3.4	微通道空间复合波导栅型复合探测器件	78
3.5	本章小结	83
第4章	EBAPS 瞬时光电倍增器件	84
4.1	EBAPS 的基本结构及原理	84
4.2	入射光电子在电子倍增层中的散射模型	86
4.2.1	入射光电子的运动轨迹基本模型	86
4.2.2	散射截面	87
4.2.3	非弹性散射的能量损失	88
4.2.4	坐标系变换	89
4.2.5	计算机模拟电子运动轨迹的物理模型	90
4.3	EBAPS 中电子倍增层内电子散射特性的影响因素	92
4.3.1	入射光电子能量对电子散射特性的影响研究	92
4.3.2	死层厚度与能量损失率的关系	94
4.3.3	掺杂浓度对倍增层内电子散射特性的影响	95
4.3.4	入射光电子束直径与电子散射特性的关系研究	95
4.3.5	倍增电子分布模拟研究	96
4.4	EBAPS 电荷收集效率理论模拟与测试方法	98
4.4.1	基底均匀下 EBAPS 电荷收集效率理论模拟研究	98
4.4.2	基底梯度掺杂下 EBAPS 电荷收集效率理论 模拟研究	102
4.4.3	EBAPS 电子倍增层增益的测试方法	106
4.5	本章小结	109

第5章 新型无衍射表面波及艾里光束瞬态非线性调制技术	110
5.1 光折变表面波与自加速艾里光束	110
5.2 LiNbO ₃ 晶体界面处表面波的调制原理	118
5.2.1 调制理论模型与数据分析	118
5.2.2 表面波激发实验结果	120
5.2.3 表面波诱导波导理论	123
5.3 克尔介质中艾里孤子的产生与瞬时调制	127
5.3.1 艾里孤子的调制机理	127
5.3.2 艾里孤子的空间瞬时调制	129
5.3.3 艾里孤子的空间稳定性与瞬时调制	132
5.3.4 艾里光束的交互作用及其瞬时调制	134
5.4 饱和非线性介质中艾里高斯光束的传输与交互的调制	139
5.4.1 艾里高斯光束的传输与调制机理	139
5.4.2 双艾里高斯光束交互作用的调制	145
5.5 本章小结	150
参考文献	152
英文缩写表	163

第1章 绪论

本章对瞬态电真空半导体光电子技术进行概述。1.1节简要陈述瞬态光电子器件的内涵,并明确本书的主要内容;1.2节主要剖析瞬态光电子器件的主要特点;1.3节简要概括瞬态电真空半导体光电子器件的研究意义和主要应用领域;1.4节介绍国内外瞬态电真空半导体光电子器件的发展现状与趋势。

1.1 光电子器件的瞬态

瞬态(Transient),《赤壁赋》中曾这样描述瞬态:盖将自其变者而关之,则天地不能以一瞬。在物理现象中,用来表示在两相邻稳定状态之间变化的物理量或物理现象,其变化时间小于所关注的时间尺度。所以,光电子器件的瞬态特性也称频响特性,它主要反映了器件的信息传递能力。器件从行为媒介分为电子型器件和光电子型器件,光电子型器件从功能上分为电光型和光电型,其器件特性又分为瞬态特性和稳态特性。光电子器件的瞬态特性主要反映了电-光子瞬时信息传递能力。限于篇幅,将从以下3个角度论述其光电子器件的瞬态特性:①紫外激光器的瞬态特性与器件优化;②电真空器件的瞬态特性与复合探测;③光折变表面波及艾里光束的非线性瞬态调制。

1.2 半导体紫外光发射器研究现状与进展

随着LED产业的蓬勃发展,半导体照明的时代即将来临。第三

代的宽禁带半导体材料和器件的研发应用，突破了蓝光芯片的技术瓶颈，促进了 LED 白光照明和全色显示的发展。因此，作为器件核心和基础的宽禁带半导体材料被广泛地开发和研究，短波长发光器件的发展也日新月异。SiC 是最早开发的第三代半导体材料，技术发展也最成熟。早在 1977 年，SiC 的蓝光 LED 就已经出现。但是当时 SiC 单晶尺寸小而缺陷密度高，制约了 SiC 基 LED 的进一步发展。随着高质量的 6H-SiC 和 4H-SiC 晶片制备成功，SiC 基 LED 得到了飞速发展，目前业已逐渐实现了商品化。然而，SiC 蓝光 LED 的亮度仍远弱于现有的红光和绿光 LED，发光强度和效率尚需要更大提高。此外，SiC 的晶片尺寸和成本以及晶体缺陷密度等方面也有待改进^[1]。

虽然 GaN 基材料和器件的开发相对较晚，但是相关工艺的发展迅猛，可以说日新月异，是当前光电器件领域中应用最广泛的宽禁带半导体材料。在 GaN 研究的初期阶段，由于 p 型制备的困难，因此 GaN 基 LED 采用了金属-绝缘体-半导体 (MIS) 结构，发光效率较低，只有 0.03%~0.1%。随着 AlN 缓冲层的应用，以及高质量 p 型 GaN 的突破奠定了 GaN 基 p-n 结光发射器件的基础。1989 年，名古屋大学的科学家第一次制备了基于 GaN 的 p-n 结 LED^[2]。此后，GaN 基 LED 和 LD 器件实现了飞跃发展。双异质结和多量子阱结构等优化的器件设计被广泛应用到 GaN 基 LED 的研究开发中，DBR 等提高发射效率的复杂技术手段也在 GaN 发光器件中大量使用。在波长更短的紫光和紫外发射波段，GaN 基材料也得到了更多的应用。从而基于 InGaN, GaN 和 AlGaN 的 LED 器件完全覆盖了蓝绿光、紫光和紫外波段。在此基础上，日本科学家用 AlN 作为有源层，成功制备了 210nm 的紫外 LED，是目前 LED 发射的最短波长^[3]。

相比于 GaN 材料体系，ZnO 具有许多得天独厚的优势：高激子束缚能、高光学增益、容易获得同质的单晶衬底、外延生长温度低、成本低、易刻蚀而使后继工艺加工更方便等。因而，ZnO 是一种很理想的紫外光电材料，众多研究组开展了 ZnO 基发光器件的研究工作 (图 1.1)。

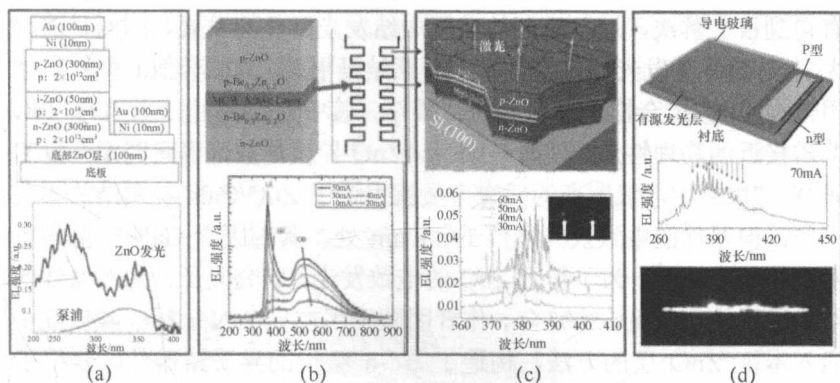


图 1.1 ZnO 基同质结光发射器件的研究进展 [4, 6, 8, 10]

尽管稳定的高质量的 p 型 ZnO 仍然难以获得,但是仍有一些研究组开展并不断推进了 ZnO 基同质结器件的研究。2005 年,日本名古屋大学的川崎等首次实现了 ZnO 同质结的室温电致发光^[5]。尽管电致发光光谱中仍然是缺陷态发光占据主导,但这一突破性的进展为研究 ZnO 的广大科研人员坚定了信心。翌年,韩国的研究人员利用 ZnO/MgZnO 的量子阱结构作为激活层,成功地抑制了同质结器件中的缺陷发射,实现了源于 ZnO 的室温紫外电致发光^[5]。同年,美国和韩国的科学家使用 ZnO/BeZnO 的多量子阱结构实现了 ZnO 的电注入激子发光,其发光的主峰位于 363nm^[6]。随后,他们又使用相同的结构,实现了电泵浦 ZnO 的激子受激发射^[7]。2008 年,美国加利福尼亚大学的研究人员使用 ZnO/MgZnO 的量子阱作为有源层,实现了 ZnO 的电泵浦受激发射^[8]。同薄膜体系相比,一维纳米结构具有许多得天独厚的优势。ZnO 纳米线(柱)的高单晶性更有利于实现掺杂,而得到高质量的 p 型 ZnO。一些研究组也就此展开了相关的研究工作,并取得了一定进展。2008 年,新加坡的研究人员通过 As⁺离子注入的方法实现了 ZnO 纳米柱的 p 型掺杂,从而构造了纳米柱同质结器件,并获得了位于 380nm 附近的较强的紫外电致发光^[9]。最近,美国加利福尼亚大学的研究人员使用 p 型的 ZnO 纳米线阵列与 n 型的 ZnO 薄膜构造了同质结器件,并实现了电泵浦的波导性质的激光发射^[10]。

虽然 ZnO 同质结的研究取得了一定进展,但 p 型掺杂的困难仍没

有得到很好解决，这严重制约着同质结发光器件的发展。因而目前绝大多数 ZnO 基发光器件都是基于异质结开展的，一些其他 p 型材料被用来与 ZnO 结合构造 p-n 异质结器件。其中，GaN 由于具有与 ZnO 非常接近的物理性质，因而 p-GaN/n-ZnO 异质结被许多研究组开发和研究。2003 年，俄罗斯的研究人员就报道了 ZnO/GaN 异质结的相关工作，但器件的电致发光峰位于 430nm 处，其归因于 GaN 一侧施主受主对的复合^[11]。为了得到 ZnO 的电致发光，研究人员开始对器件的结构进行优化改良。2005 年，作者团队采用在 p-GaN/n-ZnO 异质结中插入本征 ZnO 层的方法，构造了 p-i-n 结构的异质结器件，获得了 ZnO 的紫外发光^[12]。为了进一步改善异质结器件的性能，研究人员利用宽禁带的绝缘材料作为势垒层插入到 p-GaN/n-ZnO 异质结中，从而得到高效率的 ZnO 发射，并在加大注入的情况下实现了电泵浦的受激发射^[13]（图 1.2）。

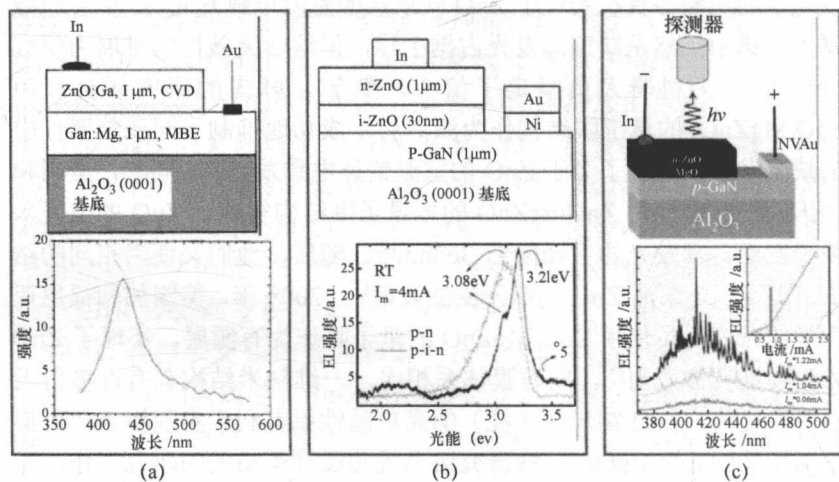


图 1.2 ZnO 基 p-n 异质结光发射器件的研究进展^[11-13]

然而在这种 p-n 异质结器件中，由于能带失配的存在和电子、空穴迁移能力上的差异，这些器件的电致发光中不可避免地含有来自 p 型层的发射。也就是说，采用 p-n 异质结的器件结构，往往难以获得纯净的 ZnO 的紫外电致发光。因此，另一种异质结构器件，金属-绝

绝缘-半导体 (Metal-Insulator-Semiconductor, MIS) 异质结器件被开发利用。器件中绝缘的势垒层能够对 ZnO 的载流子起到很好的限制作用,从而获得源自 ZnO 的本征紫外发射。浙江大学杨德仁教授的研究组在这一方面开展了较多的工作,他们利用 SiO₂ 作为势垒层,实现源自 ZnO 的本征紫外电致发光和电泵浦受激发射^[14-16]。在这些工作中,这种 MIS 异质结器件是研究的主要内容和方向 (图 1.3)。

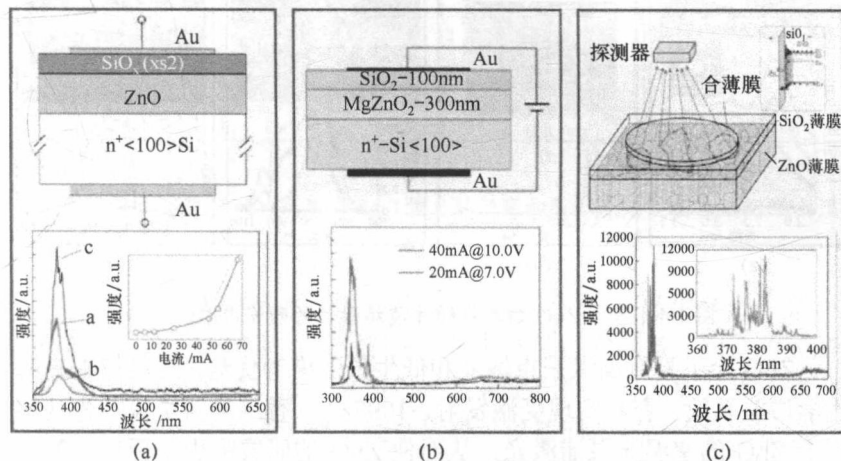


图 1.3 ZnO 基 MIS 结光发射器件的研究进展^[14-16]

异质结的能带失配降低了载流子注入效率,从而影响了发光器件的量子效率,构造纳米器件可以有效地减轻这一问题。此外,如前面所述,相比薄膜体系,纳米线阵列具有许多优异的性质,有利于构造高效的光发射器件。纳米线的高单晶性质使其具有更低的缺陷密度以及更高的载流子输运效率。同时,一维纳米阵列的波导效应使纳米线器件具有更高的光萃取效率。ZnO 纳米线可以通过许多物理和化学方法容易制备,因此许多异质结器件使用了 ZnO 纳米线作为发光器件的激活层。图 1.4 (a) 和 (b) 分别为基于 ZnO 纳米线阵列的 p-n 异质结^[17]和 MIS 结器件^[18]。由于纳米线阵列的空隙能够有效缓释外部施加的应力,以及 ZnO 纳米线的低温合成特性适于在许多柔性衬底上生长,因此如图 1.4 (c) 所示,ZnO 纳米线十分适合构造具有柔性的光发射器件^[19]。此外,核壳纳米线结构不但继承了纳米线的众多优势,

而且具有更大的异质结面积、低缺陷密度的界面和有效的表面钝化作用等优异性质，有利于实现更高效光发射器件（图 1.4 (d)）^[20]。

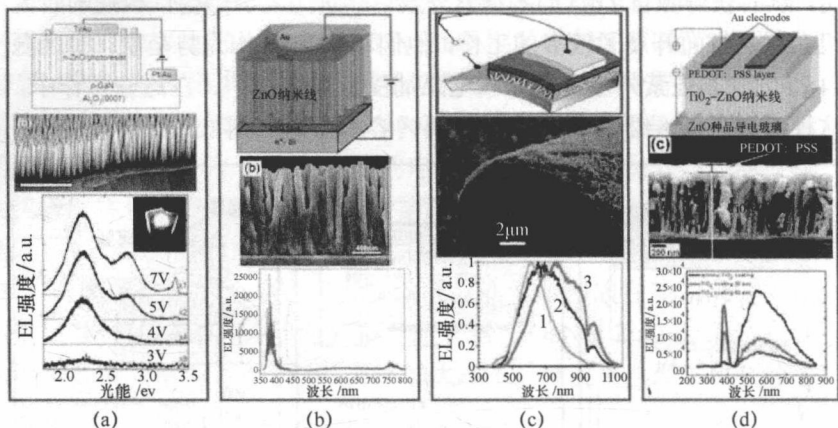


图 1.4 基于 ZnO 纳米线的异质结器件的研究进展^[17-20]

ZnO 除了具有高激子束缚能和低生长温度等优势，还具有很高的光学增益系数，容易实现受激发射。1997 年，香港的科学家首先观察到了 ZnO 的室温光泵浦激光，从而使 ZnO 的研究吸引了更广泛的关注。根据通常的划分方法，激光的谐振模式可以分为如下三种：法布里-珀罗谐振腔模式、回音廊模式和随机激光模式（图 1.5）。在光泵浦 ZnO 的实验中，三种模式的激光已经分别被观察到^[21-23]。相对于光泵浦激光，电泵浦 ZnO 的受激发射显然具有更重要的意义，也更加困难。前面提到研究人员在薄膜量子阱结构和纳米线阵列的同质结器件中，已经观察到了法布里-珀罗谐振腔模式的电泵浦 ZnO 激光发射。东南大学徐春祥教授的研究组一直致力于利用 ZnO 微米柱实现回音廊模式的激光，最近他们成功地利用 ZnO 单根微米柱与 p-GaN 构造异质结，实现了电泵浦回音廊模式的受激发射^[24]。

随机激光是一种新的激光概念，它与传统的法布里-珀罗谐振腔模式和回音廊模式激光有着本质概念的区别。传统的激光器原理是光子在谐振腔的镜面处反射，来回传播的光子在通过增益介质时被放大。当光放大足以补偿反射镜泄漏和材料吸收所引起的损耗时，处在腔谐振频率上的激光振荡将产生。从半反射镜发射的激光具有确定的频率、

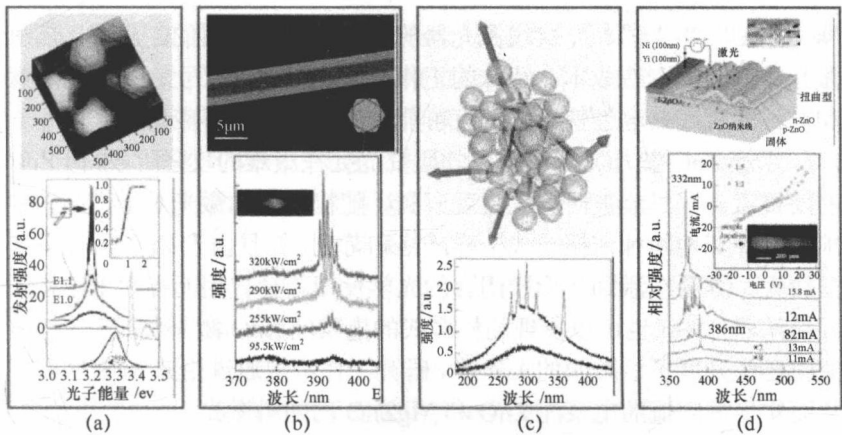


图 1.5 三种谐振模式的光泵浦 ZnO 激光的研究和随机激光模式的 ZnO 基异质结激光二极管^[26]

良好的方向性和高的相干度。然而，如果腔内存在散射体，那么，光就会向其他方向散射，从而引进附加的损耗，引起激光阈值的提高。对于传统的激光器，腔内光散射被认为是一种有害因数并且需要设法减少和避免。随机激光器则完全颠覆了以往的认识，随机激光的产生不需要外加的光学谐振腔，这种在高度无序介质中的受激发射与传统激光器中的受激发射有显著的不同。在随机激光的模式中，强烈的光散射有利于激光的产生。对于一个具有许多散射中心的增益介质，光在从增益介质逸出之前经历多重散射。多重散射增加了光在增益介质内的滞留时间（也就是增加了光在增益介质中所走的路程），增强了对光的放大。在这种情况下，不再需要通过外加反射镜来保留光于增益介质中。散射本身就可以承担这项工作。而当散射足够强时，连续的多次散射使得光子可能返回到原散射点或在空间干涉构造构成反馈回路，由此形成光的局域谐振。光的放大模式是由多次随机散射构成的，因而称为随机激光^[23]。与传统激光器不同，随机激光可以从各个方向上都能观察到激光发射，并且非常微小的荧光物质颗粒也可以作为微型的随机激光器，显示器的像素可以变得更小，分辨力得到大幅提高，因而随机激光器在平板显示等领域具有广阔的应用前景。另外随机激光独特的反馈机制对于那些在工作谱区上缺少有效反射元件的激光

器,如 UV 激光器、X 射线激光器的制造是非常有用的。此外,随机激光器低廉的制造成本、特殊的工作波长、微小的尺寸、灵活的形状和友好的衬底兼容性使得它们有可能在许多方面获得应用^[25]。

尽管 ZnO 紫外光发射器件的研究尚处在艰难的攻坚阶段,但 ZnO 的随机激光很早就被研究人员观察到。随机模式的激光对于样品的要求并不像其他两种谐振模式一样严格和苛刻,并且由于 ZnO 的光学增益较大,容易在激励下形成闭合的光学反馈路径。因而在简单结构的异质结器件中,也可以实现随机模式的电泵浦 ZnO 激光发射。一些研究组已经开展了这方面的工作^[26],研究工作希望通过构造 MIS 结器件从而实现低阈值的电泵浦 ZnO 和 MgZnO 的随机激光。

1.3 真空半导体器件瞬态优势与艾里光束的非线性瞬态调制技术

可以预见,通过贵金属纳米晶技术或等离子体共振增强手段显著提高载流子的辐射复合效率、降低载流子寿命,可以极大地提高光学频响调制的瞬态能力。但目前已有文献报道了诸多高频响 LED,但其输出功率均不甚理想。此外,如前面所述,从调制的角度讲,电注入型量子点 LED 从理论上存在功率增益带宽积约束;由于该器件结构需要采用经典的 PIN 结构^[27],只有当扩散电流与漂移电流在渡越 I 型层(量子点有源层)时才会诱发该 I 型层发光,而且其发光强度与电流强度成正比。可见为了满足高功率激射输出,增大 pn 结的横截面积,提高绝对的电流注入强度则是最为有效的技术手段,但如此一来将直接导致 pn 结电容也随之上升,即 pn 结的频响特性与功率特性相互制约。可见采用该器件结构的量子点 LED 载流子荧光寿命降低的优势无法充分体现,pn 结电容限制了调制带宽。因此,寻找能够摒除结电容制约的光源激励方式成为关键。

当前,有关半导体激光的研究采用的均为光泵浦方式,电泵浦 LD 尚未见诸报道。电子束泵浦与光泵浦非常相似,不但可以通过较小的

泵浦源实现高能量密度的激发，还可以通过泵浦源直接进行调制。因此，相比载流子的电注入，电子束泵浦是更简单有效的激励方式。由于固体材料自身的散射、缺陷等问题，进而电子在其中的迁移率远远低于真空，虽然可以通过改变二极管器件结构，增加漂移电流所占比重，但也无法与真空电子渡越速率相比拟，一般相差 2~4 个数量级。此外，电子束泵浦无须考虑异质结二极管中能带匹配和各层材料生长技术的兼容，避免了势垒对注入效率的影响，因而可以充分发挥荧光量子产率高的优势，也更容易实现半导体材料的激光发射。

此外，艾里光束是近 10 年被广泛研究的一种新型的无衍射且可以横向自加速光束随着艾里光束研究的不断深入，利用艾里光束奇异特性的应用研究也越来越广泛，典型的例子主要包括光操控微粒、弯曲的等离子体通道产生、光子弹、光路由、光互联、无电场自加速电子束、自聚焦光束合成、片光显微镜、图像传输以及激光导引电火花技术等。与此同时，关于艾里光束光场的调控研究也被推进到了任意传输轨迹，这对于任意弯曲的光束传输与应用来说具有非常重要的意义。光场的调控机制种类繁多，如在折射率梯度势场与周期性波导阵列结构中的艾里光束，具有径向对称的急剧自聚焦光束，矢量型艾里光束，非相干艾里光束以及非线性介质中的艾里光束等。

早期关于艾里光束的研究大都是集中在线性介质中，主要是利用光场的相位和振幅参数调控来达到控制艾里光束传输轨迹的目的。但是，在非线性介质中，艾里光束传输时受到非线性效应的影响，其传输轨迹和光场分布会受到影响。最主要的特点就是受非线性效应的影响，艾里光束的主瓣能量会随着传播距离发生平移，这一点在克尔非线性介质中体现得尤为明显。此外，其他非线性机制影响下艾里光束的传输、交互及能量分布等都不同情况地受到影响。国内外具体研究现状如下。

在国外，1996 年，Christodoulides 等首次研究了扩散机制下无偏压光折变介质中的新型一维无衍射平面光束的传输，利用光折变介质的自弯曲与艾里光束的横向自弯曲相平衡，在介质中形成了形不变传输的光波。2008 年，Besieris 等理论研究了慢变包络近似下具有二次和立方色散方程的平方可积加速艾里解，结果指出，在特定参数条件