DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2024.09.1001

Si 基 InGaN 可见光器件研究进展

Research Progress of InGaN Visible Light Devices on Si Substrate

供稿|刘力玮，肖嘉滢，文灿，周楚翘，曹怡诺，林正梁，李彤彤，闫梓欣，王文樑 / LIU Liwei, XIAO Jiaying, WEN Can, ZHOU Chuqiao, CAO Yinuo, LIN Zhengliang, LI Tongtong, YAN Zixin, WANG Wenliang

内容导读

Si 基 InGaN 材料因其高电子迁移率，高抗辐射，带隙可调等光电特性，在可见光通信领域展现出良好的潜力。但其发展依旧面临着材料位错密度高、器件性能差及集成度低等问题。为了解决上述问题，研究人员在材料性能，器件设计与集成等方面开展系统地研究并取得了重要进展。本文从材料位错密度调控、器件结构设计与器件集成 3 个方面讨论了 Si 基 InGaN 可见光器件的研究进展及面临的问题，并展望了其发展前景。

随着半导体技术的飞速发展，硅（Si）基铟镓氮（InGaN）可见光器件因其独特的性能优势成为研究热点。一方面，InGaN 带隙为 0.7~3.4 eV 覆盖整个可见光谱范围，具有高电子迁移率和高抗辐射等特性，在发光二极管、探测器等领域有重要应用[1]；另一方面，Si 材料不仅具有成熟的工艺技术、还具有成本低以及尺寸大等优势。将 Si 与 InGaN 材料结合，不仅可以利用 Si 基底与 InGaN 材料的优点，还为低成本的光电器件开辟新的道路[2-3]。

但 Si 基 InGaN 可见光器件仍然面临诸多挑战，主要涉及材料性能，结构设计与器件集成 3 个方面[4-5]：（1）在材料性能调控方面，由于 Si 与 InGaN 的晶格常数失配和热膨胀系数失配较大，容易产生缺陷，导致材料位错密度高。并且 InGaN 薄膜在高衬底温度（T>700 ℃）条件下生长，易发生相分离，导致薄膜质量差、材料性能低。（2）在 InGaN 可见光器件设计与制造方面，Si 和 InGaN 之间的能带结构差异较大，需要精确设计能带结构以实现有效的光电转换，增加了器件设计的复杂性；生长 Si 基 InGaN 材料需要设计复杂的外延结构，增加了器件制备的成本。（3）在可见光器件通信集成方面，由于分立器件的体积大不适合集成在同一芯片上，造成器件集成度低进而导致器件功能性单一。

为解决上述问题，研究人员开展了一系列研究工作[6-7]，主要包括：（1）通过采用等离子体辅助分子束外延（PA-MBE）技术来降低位错密度，并通过调控 InGaN 组分进行材料性能调控以提升材料性能。（2）引入外部应变下的压电光电子效应，外延层与应力缓冲层集成等方法，提升器件性能；采用纳米球光刻技术和金属有机气相外延技术等技术制备器件，降低器件制造的复杂性。（3）提出多种器件集成方法，包括垂直堆叠阵列结构微型发光二极管（mini-LED）集成，发光二极管（LED）与光电

作者单位：华南理工大学材料科学与工程学院，广东　广州　510641

探测器的集成等，提升集成密度实现多功能器件集成。最后，本文对 Si 基 InGaN 可见光器件的研究进展进行总结与展望，旨在为研究人员提供参考[8–10]。

材料性能调控

Si 基 InGaN 材料因其在可见光谱范围内的发光特性和与 Si 基材料的兼容性而备受关注，其位错密度高低及 InGaN 组分直接影响了材料的电学和光学性能。采用等离子体辅助分子束外延法与图案化衬底法调节位错密度、InGaN 组分可进一步调控材料性能。

调控位错密度

等离子体辅助分子束外延（PA-MBE）生长技术因其能够生产高质量、低缺陷密度的薄膜材料而被广泛应用于半导体器件和表面科学研究。位错作为晶体材料中的线缺陷，会显著影响材料的电学性能和机械稳定性[11–12]。PA-MBE 技术允许对薄膜的厚度和组分进行精确的控制，可以在分子层级上进行沉积，确保高质量的材料生长。在高真空条件下进行沉积，能够有效地减少杂质和缺陷，生产出高纯度和高质量的薄膜。通过调节 PA-MBE 生长过程中的位错密度，可以在分子束外延（MBE）生长过程中实现更精细的表面动力学控制，有效地减少或消除位错的形成，优化材料的性能，满足特定应用的要求，所以在 MBE 过程中调节位错密度对于获得高性能的薄膜材料至关重要[13–15]。

2015 年，Radzali 等[16] 利用 PA-MBE 法制备多孔 InAlGaN，其结构如图 1(a) 所示。通过控制刻蚀时间，降低了位错密度，在刻蚀时间为 15 min 时，位错密度由 7.07×10^9 降低至 5.76×10^9 cm^{-2}，其半峰全宽（FWHM）随时间变化关系如图 1(b) 所示。通过拉曼光谱可知孔密度会影响 InAlGaN 样品中的应力松弛量，多孔样品中的拉曼强度增强，说明 InAlGaN 层的多孔结构改善了样品的光学性能，其拉曼光谱图像如图 1(c) 所示，以上结果证明了多孔 InAlGaN 在光学和传感器器件中的应用潜力。2024 年，Kubo 等[17] 研究了利用射频等离子体辅助分子束外延在自组装单分子层（SAM）衬底上直接生长 InGaN，因为它可以在低温下的超高真空环境中生长，无需使用反应气体。此外，通过射频等离子体放电远程激发氮分子，即使在低温生长中也能充分供应活性氮，SAM 与 InGaN 晶格常数较为匹配，以上因素对 InGaN 生长有利，与 InGaN 的晶格

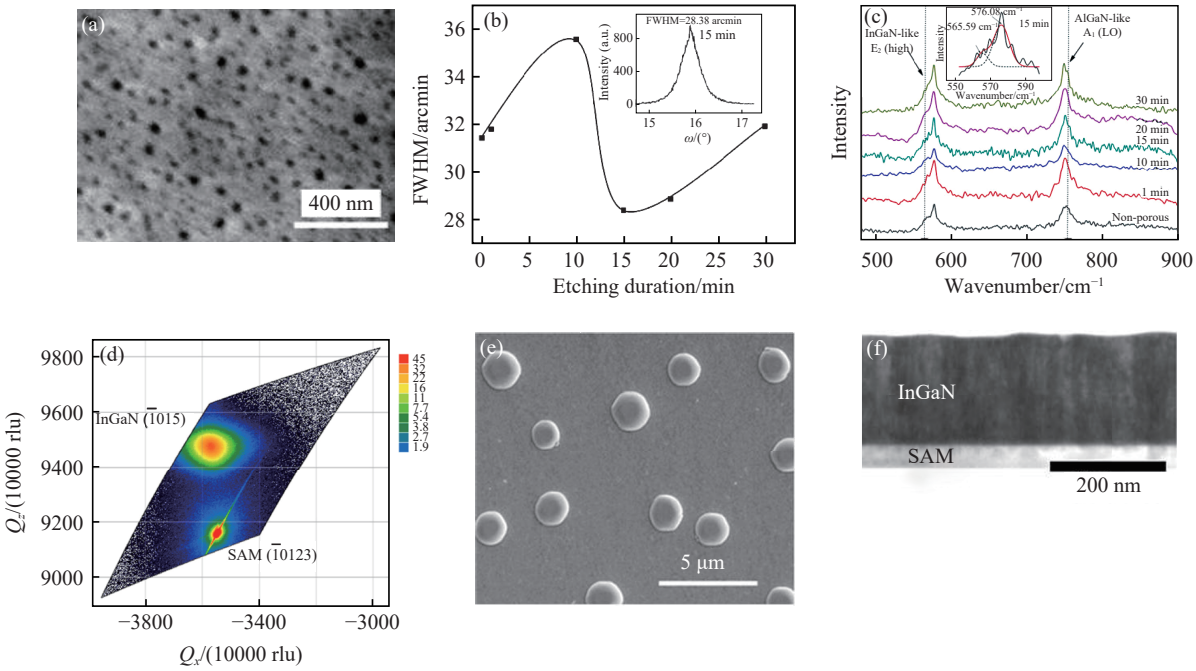

图 1　多孔 InAlGaN 的 (a) 结构图、(b) 半峰全宽随时间变化关系图以及 (c) 拉曼光谱图[16]; InGaN 薄膜的 (d)SAM (0123) 和 InGaN (015) 峰附近的倒易空间强度分布图、(e) 600 ℃ 下的扫描电子显微镜图像以及 (f) In 摩尔分数为 0.18 的透射电子图像[17]

匹配图如图 1(d) 所示。InGaN 薄膜扫描电子显微镜图像如图 1(e) 所示，在 600 ℃ 的温度下生长，所得薄膜连续且相对平坦，位错密度由 10^{10} 下降为 10^{9} cm^{-2}，其透射电子显微图像如图 1(f) 所示。

InGaN 组分调控

一些新兴的可见光吸收材料，如钙钛矿和过渡金属卤化物，仍面临器件性能稳定性和重复性差、响应速度慢等问题，这些问题严重制约了可见光光电探测器的应用。InGaN 因其具有可调谐的带隙（0.7~3.4 eV），可通过调节 In 组分实现波长选择性吸收[18]，调节位错密度，提升材料质量，是一种理想的候选材料，为提升器件性能提供了新思路。

2022 年，Chowdhury 等[19]使用 PA-MBE 在 100 nm 厚的 AlN/n-Si (111) 模板上生长了 3 个具有不同 In 含量的 InGaN 外延层，分别为样品 A（In 组分比为 26%），样品 B（In 组分比为 22%），样品 C（In 组分比为 10%），其扫描电镜图像如图 2 (a) 所示。通过高分辨率 X 射线衍射测量分析了 InGaN 中螺位错的类型和密度，如图 2(b) 所示，样品 C 的半峰全宽值小于样品 A 和样品 B 的半峰全宽值，说明样品 C 的结晶质量更好，缺陷密度最低。其光致发光光谱（如图 2(c) 所示）也证实了该结论，即随着 In 含量的增加，结晶质量降低缺陷密度增加。2024 年，Shetty 等[20]报道了一种关于生长技术的研究，该技术在 500 nm 氮化铟（InN）外延薄膜生长之前，利用相应的应变梯度作为氮化镓（GaN）/蓝宝石（Sapphire）缓冲模板上的过渡层，以实现改进薄膜质量的目的，其结构示意图如图 2(d) 所示。模板层由一个 GaN（HVPE）和一个使用 PA-MBE 生长的 100 nm GaN 缓冲层组成，在 GaN 模板上的不同应变梯度过渡层上生长一系列 InN 薄膜。研究表明，利用分级的 InGaN（In 组分比为 0~29%）过渡层减少了 InN 层中位错的传输，图 2(e) 所示为在不同衬底上生长 InN 薄膜的半峰全宽曲线，其中 S1 试样为在 GaN 衬底上直接生长的 InN 薄膜，S2 试样为在分级 InGaN（In 组分比为 0~29%）上生长 InN 薄膜，S3 试样为在分级 InGaN（In 组分比为 0~100%）上生长 InN 薄膜。与直接在 GaN 衬底上生长的 InN 相比，S2 试样边缘位错减少约 40%，光致发光增加 50%，迁移率增加 20%，如图 2(f) 所示。通过上述实验改善了惯性薄膜的光学性能，为在 InGaN 上生长高质量的外延层开辟了一条新途径，对于未来的光电器件应用提供了新思路。

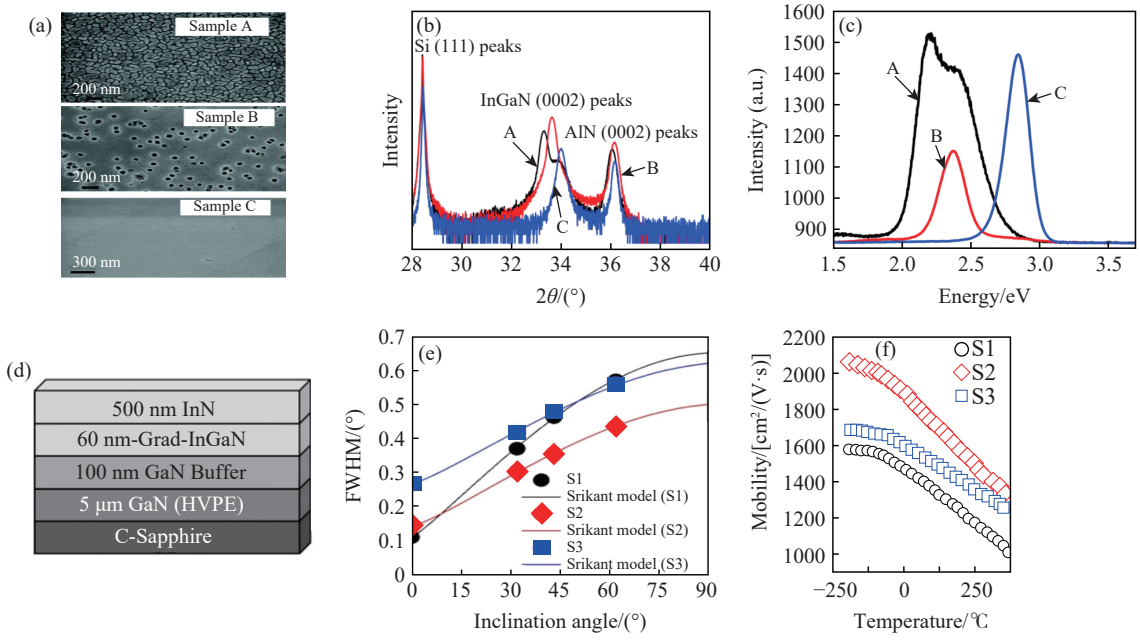

图 2　3 种 InGaN 样品的 (a) 扫描电镜图像、(b) 高分辨 X 射线衍射图谱以及 (c) 光致发光光谱[19]；生长 InN 薄膜的 (d) 结构示意图、(e) 半峰全宽曲线以及 (f) 霍尔迁移率曲线[20]

器件结构设计与制造

Si 材料因其加工技术成熟，具有成本低和大尺寸晶圆的优势，同时结合了 InGaN 材料在可见光范围内的高效发光特性和优异的光电响应性能，因此，Si 基 InGaN 器件在 LED 照明和光电探测器领域展现出巨大的应用潜力。许多学者对 InGaN LED 与光电探测器加器件设计进行了研究[21-23]。

Si 基 InGaN·LED

垂直型 LED 是一种特殊的 LED 结构，其中两个电极分布在外延片的异侧，电流几乎完全垂直流过 LED 外延层，极少横向流动。该设计有助于改善电流扩散和热量散发，从而提高 LED 的性能和可靠性[24–26]。水平结构 LED 也是一种特殊类型的 LED，其特点是芯片的两个电极位于外延片的同一侧面，电流在芯片内部主要沿水平方向流动，同样有利于电流扩散和热量散发。相比之下，由于垂直结构 LED 的电极分布在外延片的异侧，横向电流非常小，性能更优；水平结构 LED 工艺简单，制造方便[27]。

在垂直结构方面，2021 年，Lin 等[28] 制造具有垂直几何形状的基于 InGaN/GaN 量子阱的可见光 LED，将外延层蚀刻成 300 μm× 300 μm 的方形装置，有助于加速反应过程，减少由于反应过程中应力释放而导致的膜破裂。通过引入外部应变下的压电光电子效应，优化了垂直器件的发射强度和偏振特性并且可以通过施加外部应变来优化和调节垂直 LED 的偏振特性，其结构示意图如图 3(a) 所示。在 487 nm（2.546 eV）处有一个清晰的蓝色特征峰，在 504 nm（2.46 eV）处可以观察到纵向光学声子能量，其低温 PL 测试结果如图 3(b) 所示，随着温度从 295 下降到 10 K，辐射复合逐渐占主导地位，从而增加了 PL 强度。由于外部应变诱导的压电光电子效应引起的载流子复合增强，在 2.04% 的拉伸应变下，LED 的相对电致发光（EL）强度增加了 183%。在 2.04% 的拉伸或压缩应变下，发射光的偏振比分别增加或减少 135% 和 56%，其图像如图 3(c) 所示。这项工作为分立式氮化物光电子器件的制备提供了一种新方法，也为其光电性能优化提供了独特的策略。2024 年，Lee 等[29] 介绍了一种新的垂直堆叠可见光 mini-LED 阵列制备方法：将 InGaN 黄色和蓝色外延层与应力缓冲层集成在一起，以增强光电特性和结构稳定性，这种方法通过减少对光学三原色（RGB）配置的需求，大大简化了 LED 设计，降低了成本和系统复杂性。采用垂直堆叠集成技

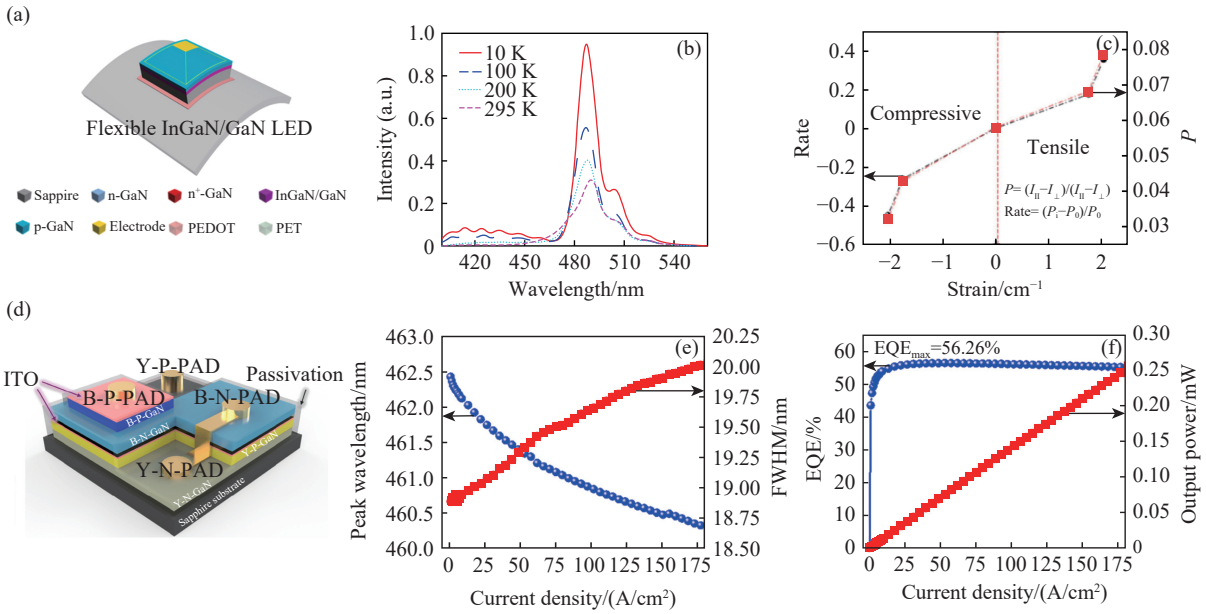

图 3　InGaN/GaN LED 的 (a) 示意图、(b) 10~295 K 范围内的低温光致发光（PL）测试结果以及 (c) 不同应力状态下极化比（*P*）的计算值（Rate 是相对于 *P* 在无应力状态下的变化率）[28]；垂直微型 LED 的 (d) 结构示意图、(e) 波长偏移和半峰全宽差电流密度曲线以及 (f) 外量子效率–电流密度曲线[29]

术，可产生高密度、高效的白光，其结构示意图如图 3(d) 所示。蓝光发射波长从 462.43 移动到 460.32 nm，位移仅为 2.11 nm，FWHM 位移约为 1.12 nm，其图像如图 3(e) 所示。在 53.14 A/cm^2 的注入电流密度下，外量子效率（EQE）最高为 56.26%。随着电流注入增加到 177.11 A/cm^2，EQE 逐渐下降到 55.07%，下降了 1.19%，其示意图如图 3(f) 所示。外量子效率下降是由非辐射载流子损耗机制引起的，该机制在低电流作用下对外量子效率的影响不大，但在大电流下占主导地位。因此，可以预期，随着施加的电流逐渐增加该器件将逐渐退化。以上结果凸显了蓝光 mini-LED 的卓越光电特性，该研究有望在照明系统的设计和应用方面取得重大进展，对汽车和通用照明市场都有潜在影响。

在水平结构方面，2016 年，Park 等[30] 使用纳米球光刻技术在扁平蓝宝石衬底上对可见光 InGaN/GaN LED 结构进行蚀刻和切割，提出了协同制造单独分离的 GaN 基纳米棒 LED 作为纳米发射器，并开发了一个水平组装的纳米 LED 系统。该系统具有数百万个微小的纳米棒，可以制作成平面照明或直视显示器以及偏振光源，其结构示意图如图 4(a) 所示。为了检查单个一维（1D）纳米棒 LED 本身的蓝移现象和峰展宽现象，在室温下使用光致发光测量观察了单独分离的一维纳米棒 LED 的 PL 特性，如图 4(b) 所示，结果表明具有 InGaN/GaN 多量子阱（MQW）的单独分离的 1D 纳米棒 LED 不会被等离子体蚀刻过程检测到降解，并且表现出良好的光学质量，可产生多种类型的新型 LED 器件。水平组装的 InGaN 基纳米棒 LED 器件显示亮度为 2130 cd/m^2，大面积（0.7 cm×0.6 cm）平面的偏振比~0.61，表现为均匀偏振。此外，根据电压的增加测量后处理纳米棒 LED 器件的电致发光强度远高于组装器件的电致发光强度。在 21.0 V 的电压下后处理样品的电致发光强度增加了约 371 倍，如图 4(c) 所示。2023 年，Meier 等[31] 报道了一种通过有机金属化学气相沉积法（MOVPE），可实现在 Si (111) 上可见光 InGaN/GaN 纳米棒 LED 结构位点和极性控制生长，其结构示意图如图 4(d) 所示。Si (111) 衬底的图案化和氧化导致 SiO_x 的位置依赖性热解吸，从而控制沉积的氮化铝（AlN）夹层的极性。扫描透射电子显微

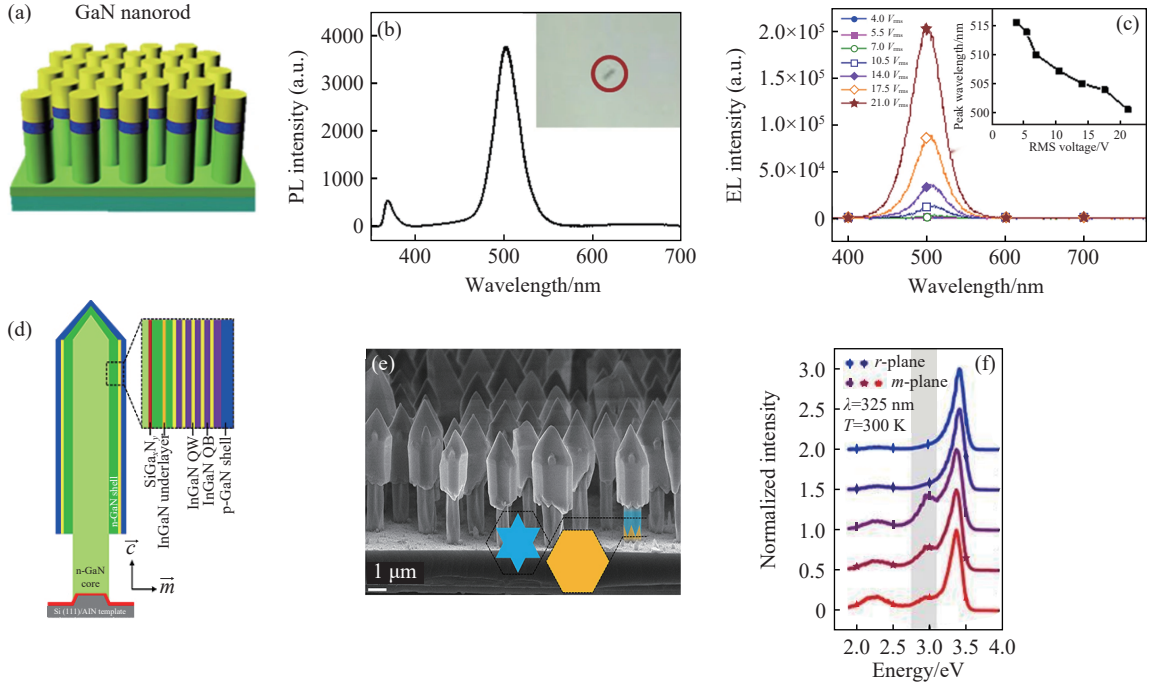

图 4　水平组装的纳米 LED 系统 (a) 在蓝宝石衬底上制作的三角形图案的圆柱形纳米棒阵列、(b) 单纳米棒的光致发光谱图以及 (c) 在 4.0 V_{rms}~21.0 V_{rms} 的外加电压下器件的相对电致发光光谱[30]; InGaN/GaN 纳米棒的 (d) LED 结构示意图、(e) Si(111) 上相应纳米棒的扫描透射电子显微镜图以及 (f) 不同位置记录的特征归一化光致发光谱[31]

镜图 4(e) 显示，在无偏振的侧壁上有多个均匀的量子阱。扫描透射电子显微镜（STEM）测量表明，InGaN/GaN MQWs 在 GaN 纳米棒核的非平面上成功生长。沿纳米棒的不同位置记录的特征归一化光致发光谱如图 4(f) 所示，空间分辨的 PL 映射分别表示晶圆上和 *m* 平面上的 MQW 发射均匀。在低激发密度下，准共振激光激发表现出主要的辐射复合；在高激发密度下，由于载流子泄漏降低了效率。

Si 基 InGaN 光电探测器

p–n 结型光电探测器是一种基于半导体 p–n 结的光电转换装置。当光照射到 p–n 结上时，光子能量被半导体吸收，激发电子跃迁到导带中形成电子–空穴对，这些电子和空穴在 p–n 结内部产生漂移导致电流流动。由于 p–n 结的单向导电性，只有当正向偏置时，电流才能流过 p–n 结。因此，当光线照射在 p–n 结上时，产生的电流与光的强度成正比，通过测量这个电流值，就可以确定光的强度。此外，p–n 结光电探测器还可以通过改变偏置电压来调节其灵敏度和响应速度[32–33]。肖特基型光电探测器是一种利用肖特基势垒来检测光信号的装置，通常由金属和半导体材料构成的肖特基结组成，当光照射到金属表面时，光子的能量可以被金属吸收激发出电子–空穴对。这些载流子穿过肖特基势垒进入半导体，形成光电流，从而实现光信号到电信号的转换。肖特基光电探测器的工作原理基于光电效应，当光子的能量大于或等于肖特基势垒的高度时，光子可以将金属中的电子激发至带有足够的能量，使其跨越势垒进入半导体，这些电子在半导体中移动，形成光电流进一步被外部电路检测并转化为电信号。

在 p–n 结光电探测器方面，2016 年 Zhang 等[34]报道了单氮化物纳米线可见光区到紫外区的 p–n 光电探测器的制备和表征。采用无催化剂的金属–有机气相外延法制备了含 30 个 InGaN/GaN 径向量子阱的氮化物纳米线，其光电探测器结构示意图如图 5(a) 所示。根据对径向 p–n 结的预期，单线探测器的电流–电压（*I*–*V*）曲线在黑暗中表现出整流行为，在光照下表现出光电流。探测器在可见光到紫外光谱范围内的响应从 2.8 eV 开始。在 3.36 eV 时，峰值响应率为 0.17 A·W^{-1}。单个纳米线光电探测器在黑暗和照明下的电流–电压曲线如图 5(b) 所示，较大正向偏置的电流–电压曲线如图 5(c) 所示，在 λ=370 nm 的照明条件下，光电探测器显示出很强的光电流。零偏置下的感应电流达到 200 pA。对于 p–n 结光电探测器，电流信号不会随着反向偏置显著变化，对于 0 到–1.5 V 的偏置，电流保持在 200~240 pA 之间。在正向偏置下，光照下的 p–n 结的暗电流行为先略有减小，然后增大。2022 年，Wang

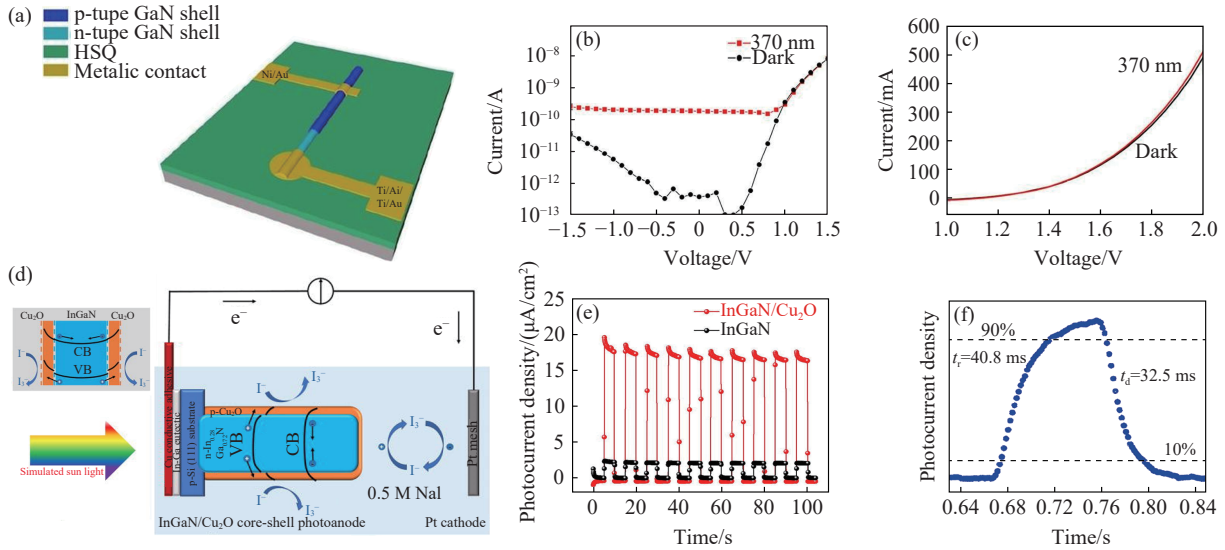

图 5　InGaN/GaN 光电探测器的 (a) 结构示意图、(b) 在黑暗和照明下的电流–电压曲线以及 (c) 较大正向偏置的电流–电压曲线[34]；InGaN/Cu_2O 核壳纳米线的 (d) 光阳极和 Pt 阴极的结构示意图、(e) 5 s 开/5 s 关的光电流密度与时间响应的关系以及 (f) 光电流密度随时间变化曲线[35]

等[35] 提出一种基于富 In 的 InGaN/Cu_2O 核壳纳米线 p–n 结的可见光自供电光电化学型光电探测器（PEC·PD），该探测器采用 InGaN/Cu_2O 核壳纳米线光阳极和 Pt 阴极的电化学电池方案，其结构示意图如图 5 (d) 所示。在 0 V 自供电下，其光电流密度响应是可重复的，在大约 5 个切波照明周期后稳定。每个循环和连续循环的初始稳定阶段表明在光阳极表面建立了反应扩散平衡，InGaN/Cu_2O 纳米线（NWs）的光电流密度提高了 8 倍，InGaN 纳米线和 InGaN/Cu_2O 核壳纳米线在 5 s 开/5 s 关的光电流密度与时间响应的关系如图 5(e) 所示。其光电流密度随时间变化曲线如图 5(f) 所示，可以看出 InGaN/Cu_2O 纳米线的光电流密度上升时间和衰减时间分别为 40.8 和 32.5 ms。通过 Cu_2O 壳层的空穴传输除了在 InGaN 纳米线核心产生空穴传输外没有明显的影响。然而，对于较短的运输路径，运输过程比测量的响应时间要快得多。由此可知，响应时间受到从电极到电解质中氧化还原载流子转移速率的控制。

在肖特基光电探测器方面，2023 年，Kong 等[36] 报告了一种自供电和高性能二维过渡金属碳/氮化物（MXene）/InGaN 范德华异质结可见光微型光电探测器（mini-PD），其装置结构示意图如图 6(a) 所示。MXene 和 InGaN 的结合产生了肖特基结，可有效分离光致电子/空穴对，形成坚固的异质结结构，同时增强载流子迁移率和寿命。mini-PD 在 470 nm 蓝光（36.5 μW/cm^2）下表现出 6.0 A·W^{-1} 的响应度、9×10^{11} Jones 的比探测率和 7.1/183.2 μs 的上升/衰减时间，0 V 偏置时的响应度和比检测率如图 6(b) 所示。对 470 nm 脉冲激光器的单脉冲光响应如图 6(c) 所示。结果表明，MXene 与 InGaN 形成了稳定的 II 型波段排列，可将光信号转换为电信号，提高了 mini-PD 的稳定性。这项工作为无需外部能量输入的高速可见光通信提供了一种策略，在节能通信、传感器网络和低灵敏度检测等应用中具有巨大潜力。2023 年，Lv 等[37] 提出了一种简单的可见光 InGaN/GaN 光电探头，用于利用界面偏振势垒和赝晶 InGaN/GaN 异质结构中的少数载流子定位进行高性能可见光探测，其结构示意图如图 6(d) 所示。该材料展示了 1.3×10^4 A·W^{-1} 的超高响应度、1.2×10^{15} Jones 的比探测率，以及在 3 V 时上升/下降时间为 2.2 ns/3.1 μs 的超快响应，其不同偏置电压下光电流和响应率的依赖性如图 6(e) 所示，不同偏置电压下光电流与入射光功率的关系如图 6(f) 所示，该阶段较高的响应度归因于 InGaN 和 GaN 层中的光生载流

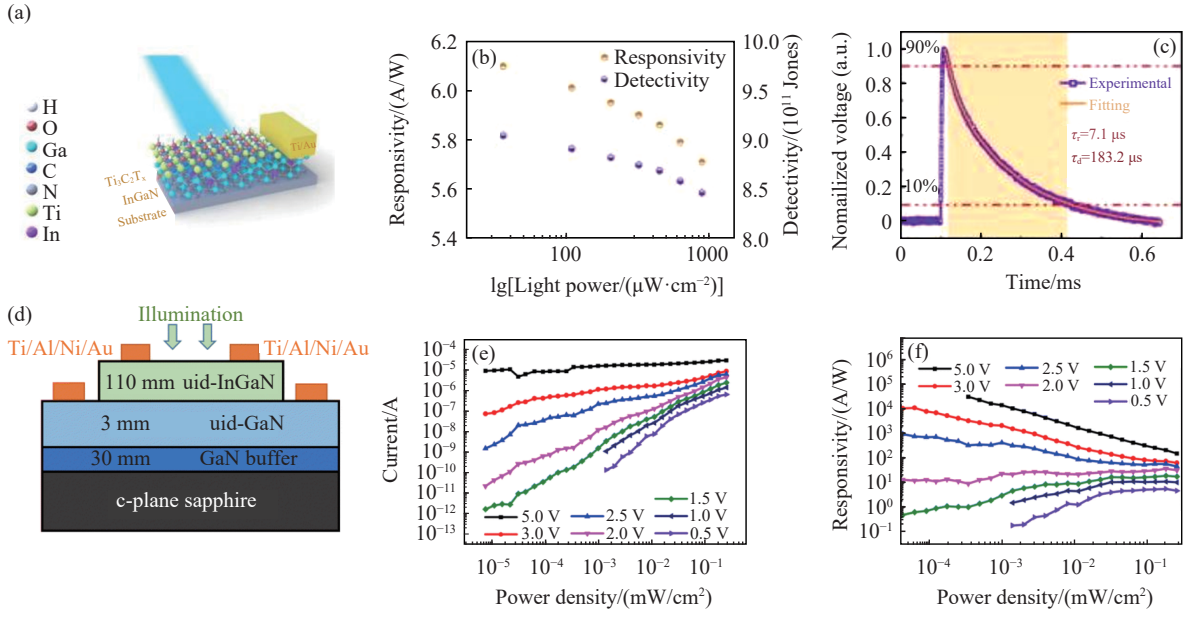

图 6　MXene/InGaN 范德华异质结的 (a) 可见光微型光电探测器结构示意图、(b) 0 V 偏置时的响应度和比探测率以及 (c) 470 nm 脉冲激光器的单脉冲光响应[36]；InGaN/GaN 异质结光电探测器的 (d) 结构示意图、(e) 不同偏置电压下光电流和响应率的依赖性以及 (f) 不同偏置电压下光电流与入射光功率的关系[37]

子对异质界面处的局域空穴的共同贡献。随着正向偏置的增加，GaN 侧势垒的高度及其耗尽区不断减小，其对局域光生空穴的贡献也相应减小。

InGaN 可见光通信器件集成

Si 基 InGaN 可见光器件的集成方法与技术近年来取得了显著进展。Si 基 InGaN 可见光器件的集成技术通过将多种功能元件如微型发光二极管（LED）光源、波导定向耦合器、微型光电探测器等集成在同一芯片上，实现了可见光信号的发射、接收、传输与处理的复合需求，使得单个芯片能够执行多种功能，从而提高了器件的应用范围[38–39]。

Si 基 InGaN LED 器件集成

Si 基 InGaN LED 器件集成是指在 Si 衬底上生长和制造 InGaN 基 LED 器件的技术，这种集成方法具有降低生产成本、提高器件性能和促进新型显示技术发展的潜力。近期的研究和发展表明，Si 基 InGaN LED 器件在多色显示和高速可见光通信领域展现出了极大的应用前景[40–42]。

2015 年，Kishino 等[43] 研究了基于四色可见光 InGaN 的纳米柱发光 LED 的单片集成。在集成的纳米柱 LED 单元中，直径 65 μm 的圆形氧化铟锡发射窗口的蓝色、天蓝色、绿色和黄色发光微型 LED（LED 1~4）排列在晶格常数为 190 μm 的 2×2 方形晶格中，其扫描电子显微镜图像如图 7(a) 所示。在注入电流为 10 mA 时，LED 1~4 的峰值波长和半峰全宽分别为（465 和 40 nm）、（489 和 49 nm）、（510 和 72 nm）和（570 和 134 nm），集成的纳米柱 LED 单元的电致发光光谱如图 7(b) 所示。该研究展示了具有不同纳米柱直径的 4 色（蓝色、天蓝色、绿色和黄色）InGaN 基纳米柱 LED 的单片集成，纳米柱 LED 单元中不同晶格常数的组合对于制造多颜色集成的纳米柱 LED 有所帮助。2023 年，Qi 等[44] 通过 InGaN 和铝镓铟磷（AlGaInP）材料体系的异构集成，开发了一种用于全彩色有源矩阵的可见光 micro-LED 微型显示器的双层薄膜显示结构，其扫描电镜图像如图 7(c) 所示。在每个集成步骤中测量了整个 InGaN 双色 micro-LED 阵列和 AlGaInP micro-LED 阵列的电流–电压特性曲线，如图 7(d) 所示，AlGaInP 红色 micro-LED 阵列的电性能在去除砷化镓衬底后下降，可能是因为在去除厚导电砷化镓（GaAs）衬底后，阵列中的电流传导路

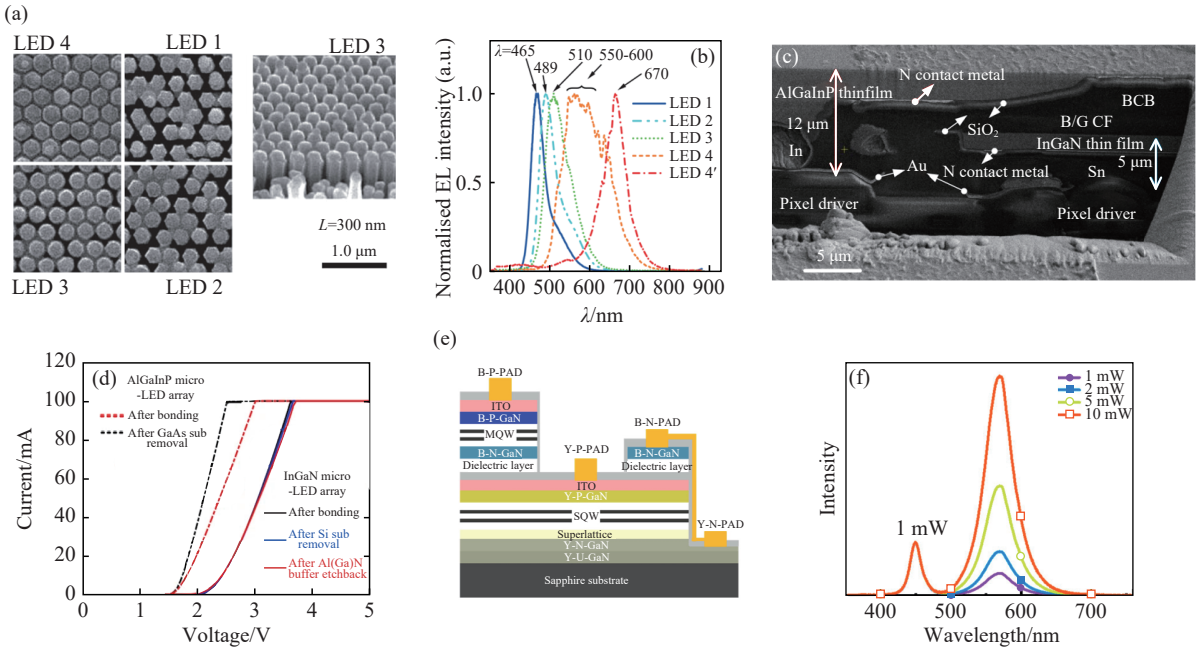

图 7　四色 InGaN 基纳米柱 LED 的 (a) 单片集成扫描电子显微镜图像和 (b) 集成的纳米柱 LED 单元的电致发光光谱[43]；有源矩阵 micro-LED 微型显示器的 (c) 双层薄膜结构的扫描电子显微镜图像和 (d) 双层发光二极管阵列电流–电压特性曲线[44]；垂直堆叠 mini-LED 阵列的 (e) 示意图和 (f) 固定蓝色 mini-LED 工作功率和可变黄色工作功率的趋势图[29]

径在几 μm 厚的 n-AlGaInP 层中受到限制。该研究通过优化 Si 基 GaN 双波长 LED 外延片的生长和像素驱动器的设计，增加 RGB 子像素的工作电流密度，可以达到更高的亮度。这种单片异构集成方法对于小尺寸微显示器应用在未来将是一个很有前途的选择。2024 年，Lee 等[29] 介绍了一种垂直堆叠可见光 mini-LED 阵列制备的新方法，将 InGaN 黄色和蓝色外延层与应力缓冲层集成在一起，以增强光电特性和结构稳定性，其结构原理横截面图如图 7(e) 所示。设计的垂直堆叠蓝色和黄色 mini-LED 具有独立的蓝色和绿色电极，通过提供不同的工作电流来实现单独控制，以实现光源波长的调制，如图 7(f) 所示，随着黄色 mini-LED 功率的逐渐增加，光色过渡到暖白色，结果显示了其优越的光电性能。

Si 基 InGaN 光电探测器集成

Si 基 InGaN 光电探测器集成技术能够利用 InGaN 材料的发光和探测特性，实现微型发光二极管光源、波导定向耦合器和光电探测器的一体化。这种光子集成芯片对于可见光通信系统尤为重要，因为它们能够进行信号的高效发射、传输和接收，实现器件的多功能化[45–48]。

2021 年，Yin 等[49] 报道了可见光 InGaN/GaN LED 中的单片集成光电探测器（PD），以监测 LED 强度随时间的波动，其发光和探测机制如图 8(a) 所示。由于斯托克位移效应，InGaN/GaN LED 结构只能响应高光子能量发射的一半，如图 8(b) 所示。为了增加 PD 接收到的发射光量，优化 PD 位置可能是一种有效的方法，测得 PD 偏置电压为 0 V 时光电流（I_{PD}）与 LED 注入电流（I_{LED}）的函数关系如图 8(c) 所示，从函数线性关系可以看出电流诱导的光谱偏移足够温和不会影响 PD 的强度检测能力，测得的光电流可用于指示 LED 的光输出强度。此外，研究发现 LED 内部形成的 PD 能够比边缘的 PD 提供更高的光电流，这与仿真预测一致。在 100 mA 的相同 LED 电流下，PD 中间（PD_{Mid}）和 PD 中心（PD_{Cen}）的光电流分别比 PD 边缘（PD_{Edg}）高 47% 和 58%。2024 年，Xu 等[50] 展示了一种可见光集成光电探测器阵列器件，该器件采用 Si 衬底 GaN/InGaN 多量子阱结构制造，其三维示意图如图 8(d) 所示。在反向偏置区域中，当反向偏置高于–5 V 时，暗电流水平在大多数情况下低于 1 μA 水平，如图 8(e) 所示，低暗电流水平表明信号质量高，因为在测量光电流时，暗电流的比例可以忽略不计。当两个激光器都偏置 95 mA 电流时，会出现最大光电流。电流大于

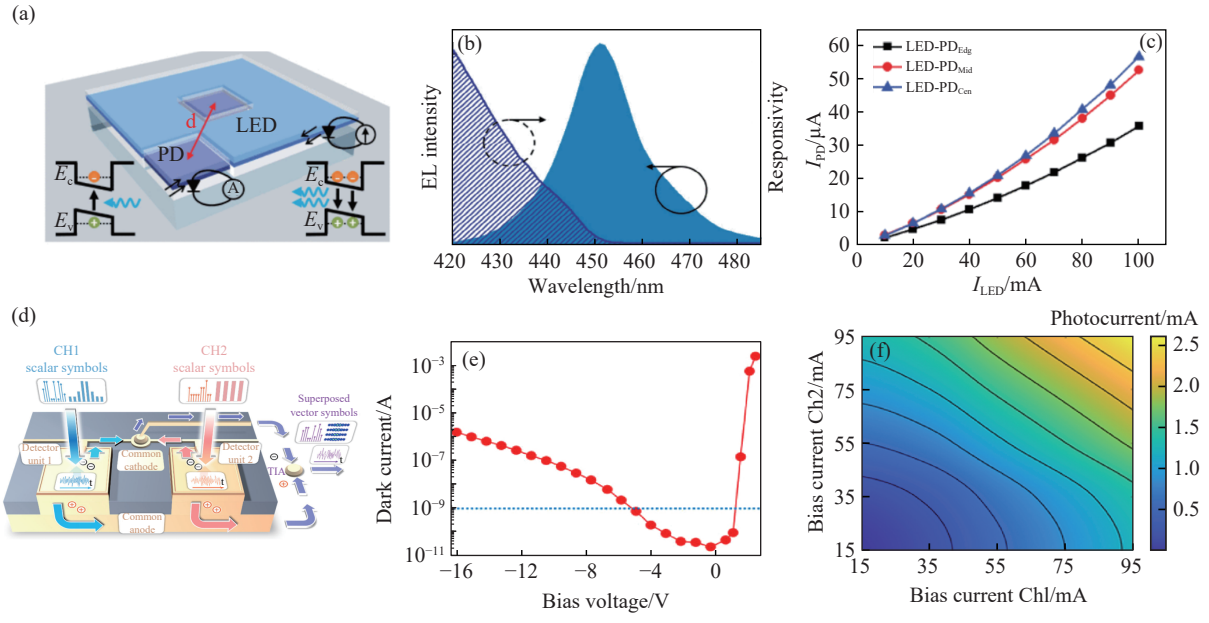

图 8　InGaN/GaN 结构的 (a) 发光和光探测机制示意图、(b) 偏置为 20 mA 的 LED 的 EL 光谱和片上 PD 的归一化光谱响应度和 (c) 光谱宽度和峰值波长与注入电流的函数关系图[49]；集成光电探测器阵列器件的 (d) 三维示意图、(e) 暗电流随偏置电压变化曲线图以及 (f) 通信系统光电流测试图[50]

95 mA 的情况不进行测试，因为激光器可能会被大偏置电流损坏，通信系统中的光电流测量如图 8(f)所示，最大光电流周围的线性度是理想的，叠加信号中的非线性较小。该研究是首次演示基于单个集成 GaN/InGaN 接收器模块的多可见光激光源接入。

具体来说，集成技术可以使微型 LED 光源发射的可见光信号有效传输并耦合，实现光功率的平均分配，进而提高了光通信的效率和稳定性[51–53]。此外，集成芯片还可以监测与耦合传输的光信号强度相匹配的光电流，这对于提高光电检测的灵敏度和准确性非常重要。通过 LED 与光电探测器的集成等，不仅提升了集成密度，还实现了多功能器件集成[54–56]。集成技术的应用不仅限于可见光通信领域，还可以扩展到传统照明与高速数据通信领域，尤其是通过集成技术实现高效的可见光信号传输，为未来的高速无线通信网络提供了新的解决方案[57–59]。Si 基 InGaN 可见光光电器件的集成技术对器件性能和应用有着显著的积极影响，它不仅提升了器件的多功能性和集成度，还有助于推动新型通信技术的发展[60–62]。

总结与展望

Si 基 InGaN 可见光器件虽然较为成熟，但在材料性能，器件结构设计与集成方面仍面临着一些问题。针对这些问题，本文从材料性能调控，器件设计与器件集成 3 个角度阐述了 Si 基 InGaN 可见光器件研究进展。（1）在材料性能调控方面，研究人员采用等离子体分子辅助外延与图案化衬底 2 种方法实现了位错密度的大幅降低，并通过调控 InGaN 中 In 的组分实现了材料性能的提升；（2）在器件结构设计与制造方面，研究人员通过设计垂直型与水平型 LED，p–n 结型与肖特基型光电探测器的器件结构，使器件各性能指标都得到提高，InGaN/GaN 异质结构光电器件达到了 1.3×10^4 A·W^{-1} 的超高响应度、1.2×10^{15} Jones 的比探测率，以及在 3 V 时上升/下降时间为 2.2 ns/3.1 μs 的超快响应；（3）在可见光通信集成方面，研究人员通过对 InGaN LED 与 InGaN 光电探测器进行集成，将多种功能元件集成在同一芯片上，提升了器件的集成度，实现了可见光信号的发射、接收、传输与处理的复合需求，使得单个芯片能够执行多种功能，从而提高了器件的性能和应用范围。

综上所述，Si 基 InGaN 可见光器件的研究已经取得了显著进展，未来的发展方向将是提高材料质量；优化器件结构、提升器件性能；推动集成，提高器件集成度实现器件多功能化，并加快市场应用与产业化进程。未来，Si 基 InGaN 器件有望成为高速数据通信领域的中流砥柱。随着技术的不断进步和市场需求的增长，Si 基 InGaN 器件在未来将是光电子产业的重要组成部分。

参考文献

[1] Moses S R, Adorno J J, Palmer A F, et al. Vessel-on-a-chip models for studying microvascular physiology, transport, and function in vitro. *Am J Physiol Cell Physiol*, 2021, 320(2): C92

[2] Song W D, Chen J X, Li Z L, et al. Self-powered MXene/GaN van der waals heterojunction ultraviolet photodiodes with superhigh efficiency and stable current outputs. *Adv Mater*, 2021, 33(27): Art No. 2101059

[3] Ding W H, Meng X Q. High performance solar-blind UV detector based on β-Ga_2O_3/GaN nanowires heterojunction. *J Alloys Compd*, 2021, 866: Art No. 157564

[4] He T, Zhao Y K, Zhang X D, et al. Solar-blind ultraviolet photodetector based on graphene/vertical Ga_2O_3 nanowire array heterojunction. *Nanophotonics*, 2018, 7(9): 1557

[5] Jain S K, Aggarwal N, Krishna S, et al. GaN-UV photodetector integrated with asymmetric metal semiconductor metal structure for enhanced respons-ity. *J Mater Sci-Mater Electron*, 2018, 29(11): 8958

[6] Li P P, Li H J, Wong M S, et al. Progress of InGaN-based red micro-light emitting diodes. *Crystals*, 2022, 12(4): Art No. 541

[7] Tan A K, Hamzah N A, Ahmad M A, et al. Recent advances and challenges in the MOCVD growth of indium gallium nitride: A brief review. *Mater Sci Semicond Process*, 2022, 143: Art No. 106545

[8] Banerjee S, Peralagu U, Alian A, et al. Metal-organic chemical vapor deposition regrowth of highly doped n^+(In)GaN source/drain layers for radio frequency transistors. *Phys Status Solidi A*. https://doi.org/10.1002/pssa.202400069

[9] Dai Y Y, Liu J X, Sun X J, et al. 480 nm InGaN-based cyan laser diode grown on Si by interface engineering of active region. *Opt Express*, 2024, 32(11): 19069

[10] Znati S, Wharwood J, Tezanos K G, et al. Metal-assisted chemical etching beyond Si: applications to III-V compounds and wide-bandgap semiconductors. *Nanoscale*, 2024, 16(23): 10901

[11] Zhuang Z, IIDA D, OHKAWA K. InGaN-based red light-emitting diodes: from traditional to micro-LEDs. *Jpn J Appl Phys*, 2022,

61(SA): Art No. SA0809

[12] Yan Z Y, Li S, Yue J Y, et al. Reinforcement of double built-in electric fields in spiro-MeOTAD/Ga_2O_3/Si p–i–n structure for a high-sensitivity solar-blind UV photovoltaic detector. *J Mater Chem C*, 2021, 9(41): 14788

[13] Bernal-Correa R, Gallardo-Hernandez S, Cardona-Bedoya J, et al. Structural and optical characterization of GaAs and InGaAs thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Optik*, 2017, 145: 608

[14] Erdogan E, Kundakci M. Influence of substrate and substrate temperature on the structural, optical and surface properties of InGaN thin films prepared by RFMS method. *Microelectron Eng*, 2019, 207: 15

[15] Mascaretti L, Mancarella C, Afshar M, et al. Plasmonic titanium nitride nanomaterials prepared by physical vapor deposition methods. *Nanotechnology*, 2023, 34(50): Art No. 502003

[16] Radzali R, Hassan Z, Zainal N, et al. Structural and optical characteristics of porous InAlGaN prepared by photoelectrochemical etching. *J Alloys Compd*, 2015, 622: 565

[17] Kubo Y, Deura M, Yamada Y, et al. Direct growth of nearly lattice-matched InGaN on $ScAlMgO_4$ substrates using radio-frequency plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Phys Status Solidi B*. https://doi.org/10.1002/pssb.202400014

[18] Chen L, Xie S H, Lan J Y, et al. High-speed and high-responsivity blue light photodetector with an InGaN NR/PEDOT: PSS heterojunction decorated with Ag NWs. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, 16(22): 29477

[19] Chowdhury A M, Singh D K, Roul B, et al. Dependence of defect structure on In concentration in InGaN epilayers grown on AlN/Si (111) substrate. *Mater Adv*, 2022, 3(15): 6237

[20] Shetty S, Kuchuk A V, de Oliveira F M, et al. Improved quality of InN thin films using a thin InGaN compressive strain gradient layer. *Cryst Growth Des*, 2024, 24(15): 6115

[21] Guo Q X, Nakao T, Ushijima T, et al. Growth of InGaN layers on (111) silicon substrates by reactive sputtering. *J Alloys Compd*, 2014, 587: 217

[22] Jia C Y, He C G, Liang Z W, et al. Improvement of radiative recombination rate and efficiency droop of InGaN light emitting diodes with in-component-graded InGaN barrier. *Phys Status Solidi A*, 2021, 218(20): Art No. 2100351

[23] Raja T, Sekhar K. Comparative analysis and study the performance of narrow bandgap and wide bandgap material for the homogeneous structure of double gate junctionless tunnel field effect transistor (DG-H-JL-TFET). *AIP Conf Proc*, 2024, 2966(1): Art No. 030017

[24] Sanyal S, Lin Q C, Shih T, et al. Significant reduction in sidewall damage related external quantum efficiency (EQE) drop in red InGaN microLEDs (~625 nm at 1 $A\cdot cm^{-2}$) with device sizes down to 3 μm. *Jpn J Appl Phys*, 2024, 63(3): Art No. 030904

[25] Cooper D, Bruas L, Bryan M, et al. Measuring electrical properties in semiconductor devices by pixelated STEM and off-axis electron holography (or convergent beams vs. plane waves). *Micron*, 2024, 179: Art No. 103594

[26] Okuno K, Goshonoo K, Ohya M. Emission mechanism of light-emitting diode structures with red, green, and blue active layers separated by Si-doped interlayers. *Phys Status Solidi A*, 2023, 220(18): Art No. 2300181

[27] Xue H Y, Taniguchi S, Saito T, et al. Characterization of GaN-based nanopillar light-emitting diodes on multicrystalline Si substrates: Insights into emitting-color distribution characteristics. *Phys Status Solidi B*. https://doi.org/10.1002/pssb.202300559

[28] Lin Y T, Chen X, Dong J Q, et al. Optimized performances in InGaN/GaN quantum-well membrane based vertical optoelectronics by the Piezo-phototronic effect. *Nano Energy*, 2021, 89: Art No. 106454

[29] Lee T Y, Huang C C, Miao W C, et al. Innovative stacked yellow and blue mini-LED chip for white lamp applications. *Micromachines*, 2024, 15(6): Art No. 796

[30] Park H K, Yoon S W, Eo Y J, et al. Horizontally assembled green InGaN nanorod LEDs: Scalable polarized surface emitting LEDs using electric-field assisted assembly. *Sci Rep*, 2016, 6: Art No. 28312

[31] Meier J, Häuser P, Blumberg C, et al. Local optical analysis of InGaN/GaN nanorod LED structures grown on Si (111). *J Appl Phys*, 2023, 134(4): Art No. 044302

[32] Hazari A, Soibel A, Gunapala S D, et al. Infrared absorption at 300 K in InGaN/GaN disk-in-nanowire arrays grown on (001) silicon. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2017, 29(20): 1751

[33] Jiang S C, Wu W Y, Ren F B, et al. Growth of GaN thin films using plasma enhanced atomic layer deposition: Effect of ammonia-containing plasma power on residual oxygen capture. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(24): Art No. 16204

[34] Zhang H Z, Messanvi A, Durand C, et al. InGaN/GaN core/shell nanowires for visible to ultraviolet range photodetection. *Phys Status Solidi A*, 2016, 213(4): 936

[35] Wang J L, Song J X, Qin L, et al. Visible-light photoelectrochemical photodetector based on In-rich InGaN/Cu_2O core-shell nanowire p–n junctions. *Appl Phys Lett*, 2022, 120(11): Art No. 112108

[36] Kong D Q, Lin T T, Chai J X, et al. A self-powered MXene/InGaN van der Waals heterojunction mini-photodetector for visible light communication. *Appl Phys Lett*, 2023, 122(14): Art No. 142104

[37] Lv Z S, Zhang S P, Wang G, et al. An ultrahigh performance InGaN/GaN visible-light phototransducer based on polarization induced heterointerface barrier and minority carrier localization. *J Mater Chem C*, 2023, 11(16): 5281

[38] Yan J B, Sun Z H, Fang L, et al. UV photonic integrated chip based on epitaxial III-N on Si for short-range on-chip data transmission. *IEEE Trans Electron Devices*, 2024, 71(5): 3056

[39] Yang H J, Ma Z G, Jiang Y, et al. The enhanced photo absorption and carrier transportation of InGaN/GaN Quantum Wells for photodiode

detector applications. *Sci Rep*, 2017, 7: Art No. 43357

[40] Han L, Ogier S, Li J, et al. Wafer-scale organic-on-III-V monolithic heterogeneous integration for active-matrix micro-LED displays. *Nat Commun*, 2023, 14(1): Art No. 6985

[41] Lu X Y, Zhu S J, Lin R Z, et al. Performance improvement of red InGaN micro-LEDs by transfer printing from Si substrate onto glass substrate. *IEEE Electron Device Lett*, 2022, 43(9): 1491

[42] Matsuda Y, Miyawaki H, Funato M, et al. Spontaneously integrated multicolor InGaN micro-light-emitting diodes for spectrum-controllable broadband light sources. *Phys Status Solidi RRL*. https://doi.org/10.1002/pssr.202400094

[43] Kishino K, Yanagihara A, Ikeda K, et al. Monolithic integration of four-colour InGaN-based nanocolumn LEDs. *Electron Lett*, 2015, 51(11): 852

[44] Qi L H, Li P A, Zhang X, et al. Monolithic full-color active-matrix micro-LED microdisplay using InGaN/AlGaInP heterogeneous integration. *Light Sci Appl*, 2023, 12(11): 258

[45] Aiello A, Hoque A K M H, Baten M Z, et al. High-gain silicon-based InGaN/GaN dot-in-nanowire array photodetector. *ACS Photonics*, 2019, 6(5): 1289

[46] Cai W, Jiao L B, Guo E Y, et al. Monolithic multicomponent integrated circuit with an arc-shape waveguide on Si substrate. *Applied Physics A*, 2023, 129(5): Art No. 378

[47] Fathabadi M, Zhao S R. Fully epitaxial semiconductor photoelectrode for UV-VIS dual-band photodetection. *ACS Photonics*, 2023, 10(8): 2825

[48] Zheng Y L, Wang W L, Li Y, et al. Self-integrated hybrid ultraviolet photodetectors based on the vertically aligned InGaN nanorod array assembly on graphene. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11(14): 13589

[49] Yin J H, An X S, Chen L, et al. Phosphor-based InGaN/GaN white light-emitting diodes with monolithically integrated photodetectors. *IEEE Trans Electron Devices*, 2021, 68(1): 132

[50] Xu Z Y, Lin X H, Luo Z T, et al. Flexible 2×2 multiple access visible light communication system based on an integrated parallel GaN/InGaN micro-photodetector array module. *Photonics Res*, 2024, 12(4): 793

[51] Ferrari L, Smalley J S T, Qian H L, et al. Design and analysis of nlue InGaN/GaN plasmonic LED for high-speed, high-efficiency optical communications. *ACS Photonics*, 2018, 5(9): 3557

[52] Jiang Y, Xie M Y, Gao X M, et al. Integrated communication and detection micro-ring light-emitting diodes. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(21): 2106001-1

[53] Wei Z X, Wang L, Liu Z X, et al. Multigigabit visible light communication based on high-bandwidth InGaN quantum dot green micro-LED. *ACS Photonics*, 2022, 9(7): 2354

[54] Kong D Q, Zhou Y, Chai J X, et al. Recent progress in InGaN-based photodetectors for visible light communication. *J Mater Chem C*, 2022, 10(38): 14080

[55] Li G Q, Wang W L, Yang W J, et al. Epitaxial growth of group III-nitride films by pulsed laser deposition and their use in the development of LED devices. *Surf Sci Rep*, 2015, 70(3): 380

[56] Lin J, Yu Y F, Zhang Z J, et al. A novel approach for achieving high-efficiency photoelectrochemical water oxidation in InGaN nanorods grown on Si system: MXene nanosheets as multifunctional interfacial modifier. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(13): Art No. 1910479

[57] Bi Z X, Gustafsson A, Samuelson L. Bottom-up approaches to microLEDs emitting red, green and blue light based on GaN nanowires and relaxed InGaN platelets. *Chin Phys B*, 2023, 32(1): 018103-1

[58] Jang J, Woo S, Min D, et al. Recent advances in nonpolar and semipolar InGaN light-emitting diodes (LEDs). *J Nanosci Nanotechnol*, 2015, 15(3): 1895

[59] Zhang H F, Ebaid M, Min J W, et al. Enhanced photoelectrochemical performance of InGaN-based nanowire photoanodes by optimizing the ionized dopant concentration. *J Appl Phys*, 2018, 124(8): Art No. 083105

[60] Gridchin V O, Kotlyar K P, Reznik R R, et al. Multi-colour light emission from InGaN nanowires monolithically grown on Si substrate by MBE. *Nanotechnology*, 2021, 32(33): Art No. 335604

[61] Motoki K, Engel Z, Matthews C M, et al. Observation of interfacial strain relaxation and electron beam damage thresholds in $Al_{0.3}In_{0.7}N$/GaN heterostructures by transmission electron microscopy. *J Vac Sci Technol B*, 2022, 40(5): Art No. 052210

[62] Palenskis V, Matukas J, Glemza J, et al. Review of low-frequency noise properties of high-power white LEDs during long-term aging. *Materials*, 2022, 15(1): Art No. 13

基金项目：国家级大学生创新创业训练计划资助项目（202410561010）。

作者简介：刘力玮（2005—），男，黑龙江省哈尔滨市人，华南理工大学在校本科生，主要研究方向：第三代半导体材料与器件。通信地址：广东省广州市天河区五山路 381 号华南理工大学；E-mail：3092145911@qq.com。

通信作者：王文樑（1989—），男，福建省宁德市人，博士，教授。主要研究方向：第三代半导体材料与器件。通信地址：广东省广州市天河区五山路 381 号华南理工大学；E-mail：wenliangwang@scut.edu.cn。