

文章编号: 2095-4980(2024)10-1094-10

## 高性能宽谱上转换成像发光二极管性能优化

韩尚杰<sup>1,2,4</sup>, 王屹<sup>1</sup>, 王汉斌<sup>3</sup>, 杨宁<sup>1,4</sup>, 楚卫东<sup>1,4</sup>, 白鹏<sup>\*1,4</sup>

(1.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 2.北京邮电大学理学院, 北京 102206;  
3.中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川绵阳 621999; 4.计算物理全国重点实验室, 北京 100088)

**摘要:** 高性能宽谱上转换成像器件在医疗、食品安全、无损检测和国家安全等领域中发挥着重要作用, 但现有半导体上转换器件因探测范围窄、上转换效率低而受到限制。为实现更宽谱和高效的上转换, 本文通过优化 LED 结构, 显著提升了棘轮上转换器件的性能。改进后的 LED 发光效率提升了 2 个数量级,  $\mu\text{A}$  量级的驱动电流下即可开启发光, 发光光谱更接近规则洛伦兹线型, 器件整体面发光均匀性也显著提升。研究明确了性能优化原则, 并为未来上转换器件的改进提供了参考方向。

**关键词:** 上转换成像; THz 探测; 宽谱探测; LED 发光; 棘轮探测器; 上转换效率

中图分类号: TN312+.8

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024359

## Performance optimization of light-emitting diodes for high-performance broadband upconversion imaging

HAN Shangjie<sup>1,2,4</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, WANG Hanbin<sup>3</sup>, YANG Ning<sup>1,4</sup>, CHU Weidong<sup>1,4</sup>, BAI Peng<sup>\*1,4</sup>

(1.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;

2.School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 102206, China;

3.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

4.National Key Laboratory of Computational Physics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** High-performance wide-spectrum upconversion imaging devices play an important role in fields such as medical care, food safety, non-destructive testing, and national security. However, existing semiconductor upconversion devices are limited by their narrow detection range and low upconversion efficiency. In order to achieve a wider spectrum and efficient upconversion, this study significantly improves the performance of the ratchet upconversion device by optimizing the LED structure. The improved LED's electroluminescence efficiency has been increased by two orders of magnitude. It can turn on light at a driving current of  $\mu\text{A}$  level, and its electroluminescence spectrum is closer to the theoretical regular Lorentz line. The overall surface luminescence uniformity of the device is also significantly improved. The research clarifies the performance optimization principles and provides a reference for future improvements in upconversion devices.

**Keywords:** upconversion imaging; THz detection; broad spectrum detection; LED light emission; ratchet detector; upconversion efficiency

将光子从低能转换为高能的上转换过程有望用于高效太阳能电池、高灵敏度生物成像和大幅面红外/太赫兹 (Terahertz, THz) 成像<sup>[1-5]</sup>, 但到目前为止, 宽谱激发下的光谱上转换(从近红外(Near Infrared, NIR)到 THz)一直十分具有挑战性<sup>[6]</sup>。基于镧系化合物的纳米粒子广泛用于提高光伏效率和无背景生物成像<sup>[1,3-4,7]</sup>, 但这些纳米粒子的吸收光谱覆盖范围主要集中在近红外范围( $<1 \mu\text{m}$ ), 很难实现更长波长的红外或 THz 吸收。另一种具有竞争力的上转换方法是基于非线性光学晶体(周期极化铌酸锂(Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN))中的和频效应的参量上转换探测, 该方法可将 THz 辐射、中红外(Mid Infrared, MIR)光子或红外电信波段光子转换为近红

收稿日期: 2024-05-01; 修回日期: 2024-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12104061; 62327804); 国家重点研发计划资助项目(2023YFF0715000)

\*通信作者: 白鹏 email:bai\_peng@iapcm.ac.cn

外光子，以供商用 Si 二极管或电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)探测<sup>[8-11]</sup>。但这种上转换技术需要额外的高功率激光泵浦源，并依赖于非线性光学晶体，相对复杂的光学装置和较窄的光谱探测范围限制了这种转换探测器的应用范围。使用辉光放电探测器(Glow Discharge Detector, GDD)的 3D 上转换技术是一种简单且廉价的方案，在毫米波(mmW)/THz 成像系统中具有良好的表现，但该方法在 MIR 或 NIR 范围内的性能需进一步研究<sup>[12]</sup>。M Kozina 等<sup>[13]</sup>展示了一种利用 SrTiO<sub>3</sub> 中耦合声子的非线性将能量转换为高能模式的新机制。是否可以通过这种非线性声子上转换过程控制更高频率的中红外模式还需进一步探索。近年来，基于里德堡原子的 THz 探测在上转换间接探测及成像方面显示出较大的应用潜力，但与参量上转换类似，里德堡原子上转换的原理也需要高能量激光泵浦实现，这无疑增加了系统复杂性与能耗<sup>[14-15]</sup>。

基于半导体的上转换是另一种有前景的上转换机制，红外或 THz 光子首先被光电探测器吸收，然后光子驱动发光二极管(Light Emitting Diode, LED)发射近红外光，从而实现上转换<sup>[5,14]</sup>。经过多年的发展，基于集成光电探测器和 LED 的概念，已经在 NIR、MIR 和 THz 范围内实现了各种上转换器件<sup>[16-18]</sup>。上转换过程中的额外能量来自施加的电场，核心的上转换器件一般为两端器件。其中基于量子阱光电探测器(Quantum Well Photodetector, QWP)的上转换器件是一种发展较为成熟的上转换器件<sup>[19-21]</sup>。基于 QWP-LED 的红外热成像系统及 THz 原型成像系统已陆续被报道<sup>[18,22]</sup>，其无需在感光芯片上集成 Si 读出电路即可轻松实现大尺寸红外成像，且与半导体加工工艺完全兼容。但 QWP 中的子带间跃迁(Intersubband Transition, ISBT)机制限制了器件的响应光谱覆盖范围，且需要器件引入额外的光耦合结构才能实现正入射响应<sup>[23]</sup>。针对这一问题，提出另一种可替代 QWP 的方法：使用 GaAs 同质界面功函数内光发射探测器(Homojunction Interfacial Workfunction Internal Photoemission, HIWIP)集成上转换器件<sup>[24]</sup>。HIWIP-LED 上转换器件允许正入射响应并表现出宽带光响应(4~20 THz)，在此基础上已经实现了高分辨率 THz 成像。但 HIWIP 的低激活能(10 meV)会导致较大的暗电流，并需要极低的工作温度(4 K)条件<sup>[25]</sup>。在此前的研究中展示过一种超宽带上转换器件，基于集成的 p 型 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 棘轮光电探测器(Ratchet Photodetector, RP)和 GaAs 双异质结 LED(Double Heterojunction-LED, DH-LED)。RP-LED 允许垂直入射激发，因而无需基于 ISBT 机制的上转换器中所需的光学耦合结构。与其他上转换器件相比，从 THz 到 NIR 区域(4~200 THz)的超宽带光响应覆盖了更宽的频率范围。由于棘轮效应，上转换器还可在零偏压下用作光伏探测器，响应范围为 15~200 THz，来自 1 000 K 黑体的宽带辐射成功上转换为 NIR 光子。此外，由于固有势垒较高，棘轮光电探测器的暗电流也受到显著抑制，使上转换器件能够在高温或大偏置下工作。尽管量子棘轮红外探测器和双异质结 LED(Quantum Ratchet Infrared Photodetector-LED, QRIP-LED)已经实现了上转换功能演示，但器件整体的上转换效率过低，器件发光均匀性较差，无法实现上转换成像演示，其性能还有待进一步提升。

针对 QRIP-LED 器件上转换效率过低的问题，本文采用优化的 GaAs 基双异质结 LED 结构提升器件上转换性能。详细研究了优化前、后器件中 LED 的性能，并通过发光光谱研究了优化后器件在单色性及峰值发光波长方面与未优化器件的区别；通过对发光效率研究对比了器件优化后内外量子效率情况，并通过速率方程理论拟合得出未优化器件的内量子效率，揭示了未优化 QRIP-LED 器件上转换效率低的根本原因。

## 1 结构与方法

图 1(a)为 QRIP-LED 上转换器件结构示意图，从下到上依次为 GaAs 半绝缘衬底、下接触层(GaAs, Be 掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )、16 周期的量子棘轮探测器结构功能层、LED 结构功能层、上接触层(GaAs, Be 掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )、下电极为 p 型欧姆接触的 Ti/Pt/Au、上电极为 n 型欧姆接触的 Pd/Ge/Ti/Pt/Au。其工作原理为：THz 辐射在衬底一端入射，经过 QRIP 结构功能层时，THz 辐射被吸收并转换为光生载流子，在两端电场的作用下，光生载流子注入 LED 结构中，并在其激活区发生辐射复合，产生近红外光子，从而实现 THz 到 NIR 的上转换过程。

其上转换能带微观机制示意图如图 1(b)所示，其中 THz 吸收的关键载流子行为为冷热空穴能量转换<sup>[26]</sup>。在一定偏压下，器件的能带结构发生倾斜和弯曲，由热激发、外部场注入等原因产生的大量热空穴跃过势垒注入吸收体。冷热空穴的能量传递发生在热空穴弛豫过程中，热空穴释放出一个光学声子，并带着过剩的能量与空穴准费米能级以下的冷空穴发生非弹性散射，迅速建立起热化的准稳态热空穴分布。这种分布可以降低吸收体中的载流子的活化能，并实现 THz 响应。

上转换器件的响应光电流谱及 LED 的发射谱如图 1(c)所示，其中，QRIP 的宽谱光电响应能力被 QRIP-LED 上转换器件完美继承，整个器件的光谱响应范围覆盖 4~200 THz，LED 在温度为 10 K 时的发光波长约为 828 nm。实现从 THz 到近红外的上转换的额外能量来源于外加电场。

图 1(d)~(e)分别给出了未优化 LED(Unoptimized LED, ULED)和优化 LED(Optimized LED, OLED)的详细结构

参数。ULED 和 OLED 均采用传统 GaAs/AlGaAs 双异质结结构，而 OLED 拥有更厚的激活区(400 nm)与更高的 AlGaAs 势垒层(Al 组分最高为 0.3)，且为了保证载流子的注入效率，OLED 的 AlGaAs 势垒层采用了渐变势垒与渐变掺杂结构。OLED 为针对常温 NIR 上转换器件所优化结构，本文着重研究其深低温特性<sup>[27]</sup>。

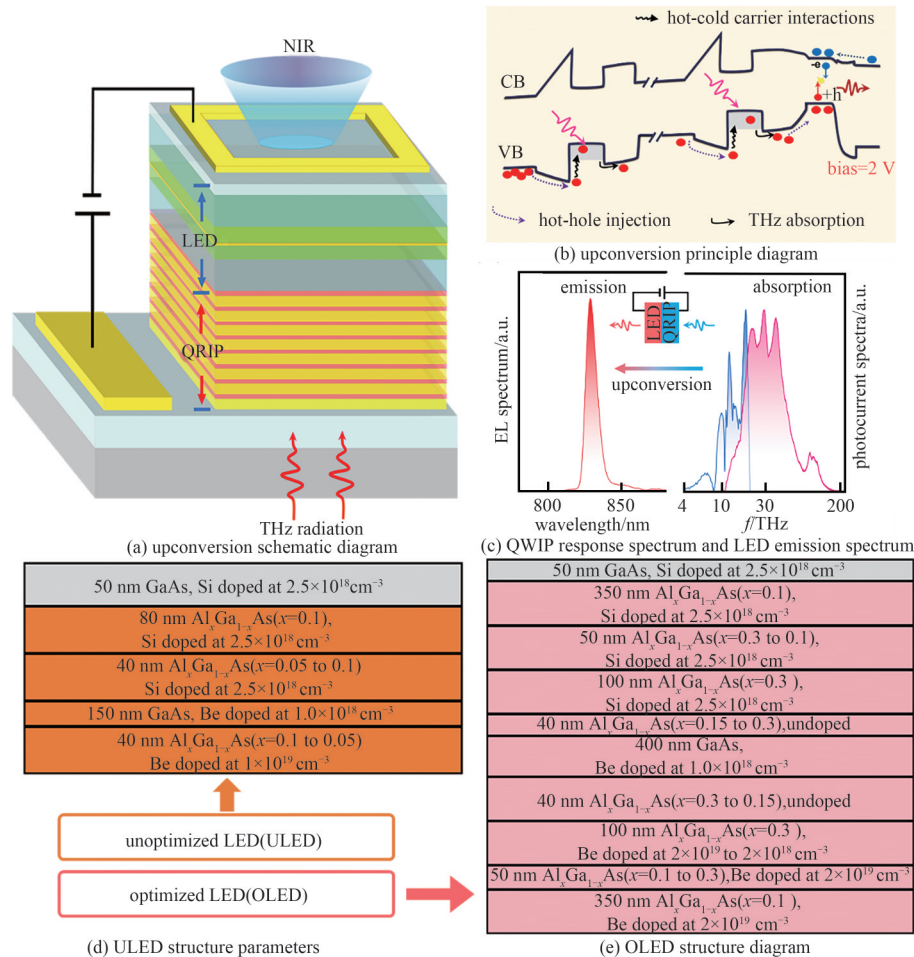


Fig.1 Device structure and principle diagram

图1 器件结构及原理示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 器件电致发光光谱的性能

器件的制备工艺如下：将生长完成的 QRIP-OLED 外延片清洗干净后对其进行解理；随后，利用标准光刻工艺对其进行光刻与干法刻蚀以形成台面结构，并利用金属沉积和剥离工艺制备 p 型(Ti/Pt/Au:25 nm/55 nm/300 nm)和 n 型(Pd/Ge/Ti/Pt/Au:55 nm/100 nm/25 nm/55 nm/300 nm)电极，之后进行快速热退火形成欧姆接触；最后，对器件电极打线和封装。

QRIP-OLED 器件的实物图如图 2(a)所示。图 2(b)为 QRIP-OLED 器件在温度为 4 K 时的伏安特性曲线。加载在器件两端的偏压为 1.5 V 时，LED 开启；若加载在器件两端的电压为 2 V，器件的暗电流为 29.6 mA，则阻值为 67.6 kΩ。

利用海洋光学光纤光谱仪(Ocean insight HR6 NIR)对器件光谱进行测试，利用 CCD 相机(Andor iKon-DU934-BEX2)进行器件发光均匀性测试。对于光功率的测量以常温下有无窗片时的数据进行校正：在常温下光功率计(Thorlabs S130C)紧贴器件测量所得值与透过低温恒温器与窗片所测结果进行对比，得出一个系数，这个系数作为低温下器件在低温恒温器中产生的各种损耗的校正标准。

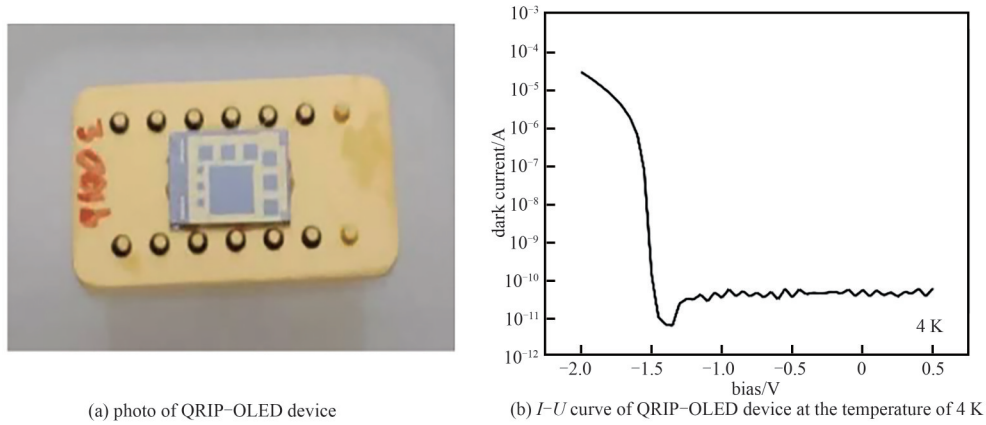


Fig.2 Device display and volt-ampere characteristics

图2 器件展示及伏安特性

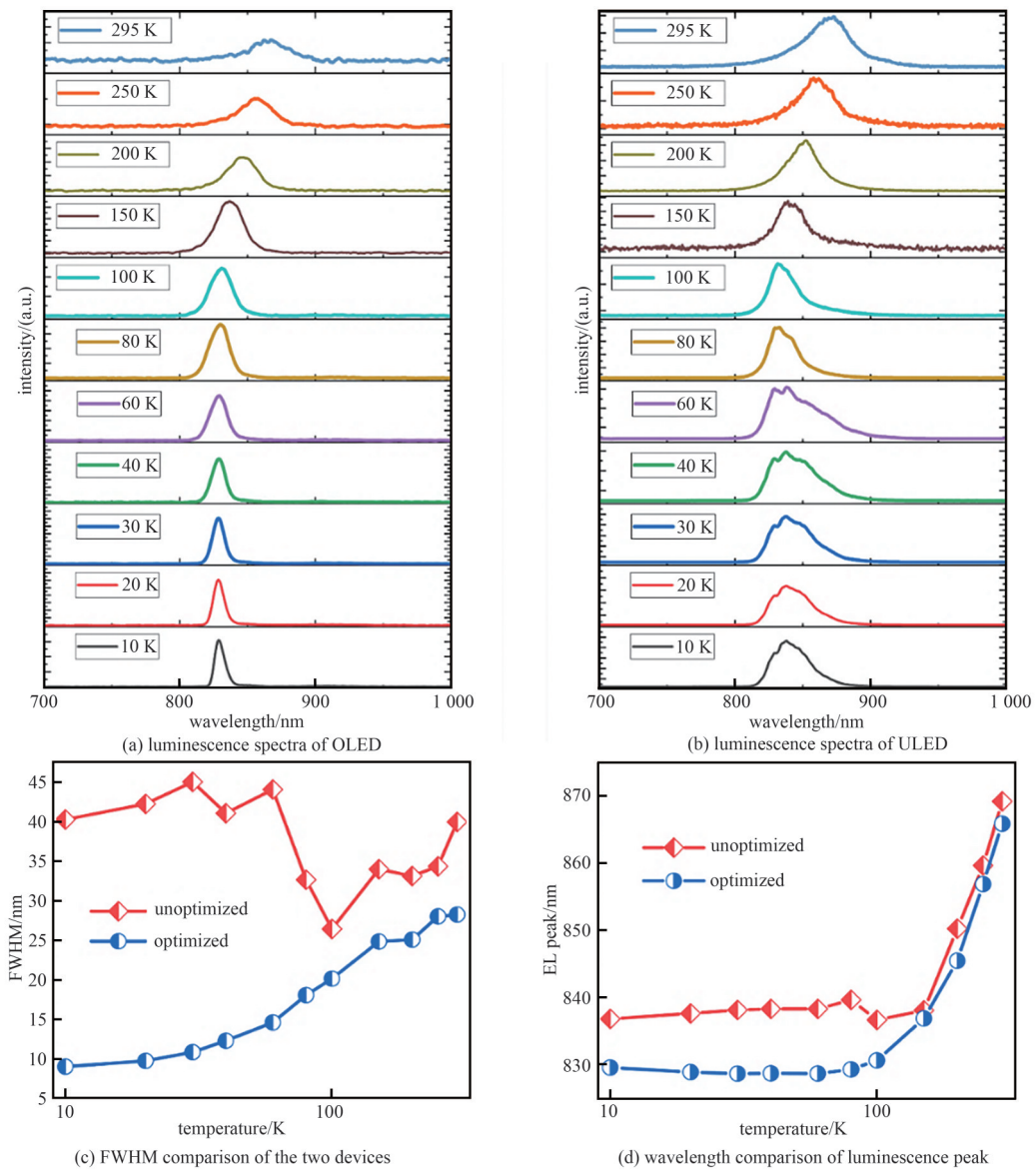


Fig.3 Comparison of the luminescence of ULED and OLED

图3 ULED与OLED发光情况对比

图 3(a)~(b)分别为 OLED 与 ULED 器件的变温电致发光光谱。随着温度从低到高变化，2 个器件发光光谱的信

噪比均越来越差,且光谱展宽逐步增加。不同之处在于, OLED在低温下表现出较为完整的洛伦兹线型,符合标准LED的特征,而ULED即使在低温下的线性也不是特别光滑,不符合洛伦兹线型的特征。ULED的能带结构未经过优化不够完善,其光谱本身存在瑕疵。一个可能的原因是ULED器件中缺陷态密度较多,材料质量不高,激活区局部材料的原子排布缺乏长程有序性,出现了带尾态,从而导致其单色性变差,且发光效率较低。为证实这一猜测,对器件的发光光谱中不同温度下2种结构LED的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)与峰值发射波长进行了对比和讨论。如图3(c)所示,可以发现, OLED在低温下具有较小的FWHM,尤其在10 K时,其FWHM仅有8.9 nm,且温度低于100 K时, OLED的FWHM均未超过20 nm,证明其拥有良好的单色性。相较之下, ULED的FWHM过大。一般而言,由于低温会抑制非辐射复合,半导体发光材料随着温度降低发光性能会显著变好,但即使温度为10 K时, ULED的FWHM都大于40 nm,证明其单色性表现较差。图3(d)中显示了OLED和ULED在不同温度下的峰值发光波长位置,可以发现,在任何温度下, OLED的峰值发光波长数值均小于ULED。通过Varshni关系计算得到p型GaAs(Be掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )材料在10 K时能量带隙对应光学波长应为828 nm。通过对比可以发现, OLED的峰值发光波长更接近这一数值,而ULED与这一数值差距较大是由材料内部缺陷及不均匀性所导致的带尾态造成的。

未优化的器件一方面内量子效率较低,另一方面内部缺陷可能造成参与辐射复合的载流子并非近似的标准玻尔兹曼分布,导致的结果就是随着发光波长(或能量)的变化,发光强度发生明显的涨落变化,这种不连续性体现在发光光谱上就是谱线形状不规则光滑,无法用洛伦兹函数近似拟合。而优化后的器件发光内量子效率高,且参与发光的载流子较为符合标准玻尔兹曼分布,复合效率高,复合速率涨落小,因此优化器件的发光光谱更加规则。

## 2.2 LED的电致发光效率

为进一步研究2种LED的性能差异,对器件的电致发光效率(Electroluminescent Efficiency, ELE)进行表征。图4(a)为OLED的ELE图,可以发现,随着注入电流密度增大, OLED器件的ELE表现出先增大后减小的变化,这一趋势符合标准发光二极管效率变化特性,是典型的效率下降曲线的特征。在低电流密度下,器件发光效率随着温度升高逐渐降低,这是由于温度升高会导致SRH(Shockley-Read-Hall)复合与俄歇复合效率的显著增大,从而导致器件辐射复合效率降低。已有的研究表明,注入电流增大导致的效率降低一般是由于俄歇复合效率的增大,而温度升高导致的LED效率降低则主要是SRH复合占主导所致。同时可以发现,在低温、低电流密度的情况下, OLED的ELE存在一些涨落,这主要是深低温测试的测量误差所导致。图4(b)为ULED的ELE图,对比可知, ULED中LED在可测量电流密度范围内,虽然ELE并无显著降低,但其开启电流阈值相较于OLED提高了2个数量级,且平均的ELE强度相较OLED降低了3个数量级,证明其ELE远低于OLED。

为进一步了解二者性能差异的根本原因,需弄清不同温度下的LED中的复合机制。SRH非辐射复合、辐射复合和俄歇复合共同决定了LED的发光特性。ABC模型是研究LED中这3个主要复合机制的最简单且使用最广泛的方法<sup>[28-29]</sup>。如果给出了在所有温度下的SRH复合系数(A)、辐射复合系数(B)和俄歇复合系数(C),则所有温度下的复合机制都可以被确定。因此,研究LED性能的最直接方法是测量不同温度下的3个复合系数,但在如此低的温度下(10 K)测量3个系数是不切实际且困难的。

Ryu等<sup>[30]</sup>开发的改进版ABC模型提供了一种新的方法,可通过单个拟合参数(最大内部量子效率)分析LED性能。该方法的优势在于,在不了解A、B和C系数的情况下,可明确地确定在任意电流密度和温度下的内量子效率(Internal Quantum Efficiency, IQE)和每个复合电流。注入电流密度下的内量子效率 $\eta_{in}$ 可通过数值求解方程(1)确定:

$$\eta_{in} = 1 - \frac{(1 - \eta_{max})}{2J} \left(1 + \frac{\eta_{in} J}{\eta_{max} J_{max}}\right) \sqrt{\frac{\eta_{in} J J_{max}}{\eta_{max}}} \quad (1)$$

式中:  $J$ 为注入电流密度;  $\eta_{max}$ 和 $J_{max}$ 为IQE的最大值和对应的注入电流密度。

通过测量与电流密度有关的电致ELE可以确切知道 $J_{max}$ ,并可根据测量结果拟合 $\eta_{max}$ 。该方法指出,在不确定A、B、C参数的情况下,对于给定的 $J_{max}$ 和 $\eta_{max}$ ,仅存在一条对应的IQE-J曲线。图4(c)为通过上述方法拟合的OLED器件内量子效率,其中最大内量子效率为0.9,可测量范围内平均内量子效率约为0.76。OLED器件在不同注入电流密度下的外量子效率由实验ELE数据可以直接计算得到,在此基础上可进一步得到OLED器件的平均光提取效率(Light Extraction Efficiency, LEE)。LEE定义为LED器件中最终从器件逃逸出的光与其产生的总光能的比值,而平均光提取效率是器件在各个不同电流密度下光提取效率的平均值。计算得LEE约为0.010 4,这

一数值与利用菲尼尔透反射定律计算结果相当(0.011 3)。利用这一数据可求出 ULED 器件的最大内量子效率为 0.024，可测量范围内的平均内量子效率为 0.006 4。LED 开启后，相同电场强度下改进前后器件的能带结构仿真计算结果如图 5(a)和 5(c)所示。造成这一差异的原因归咎于 ULED 中 LED 结构中势垒过低且激活区厚度过薄。理论上，较薄的激活区可有助于减少载流子的扩散距离，提高复合几率，但如果激活区过薄，可能会导致载流子注入不足，电子空穴注入效率较差，直接影响激活区的辐射复合效率，且较薄的激活区厚度可能导致产生的光无法有效逃逸出 LED 区域，从而降低发光效率。再者，ULED 势垒较低，对激活区载流子的限制效果较差，导致器件辐射复合速率相对较低。

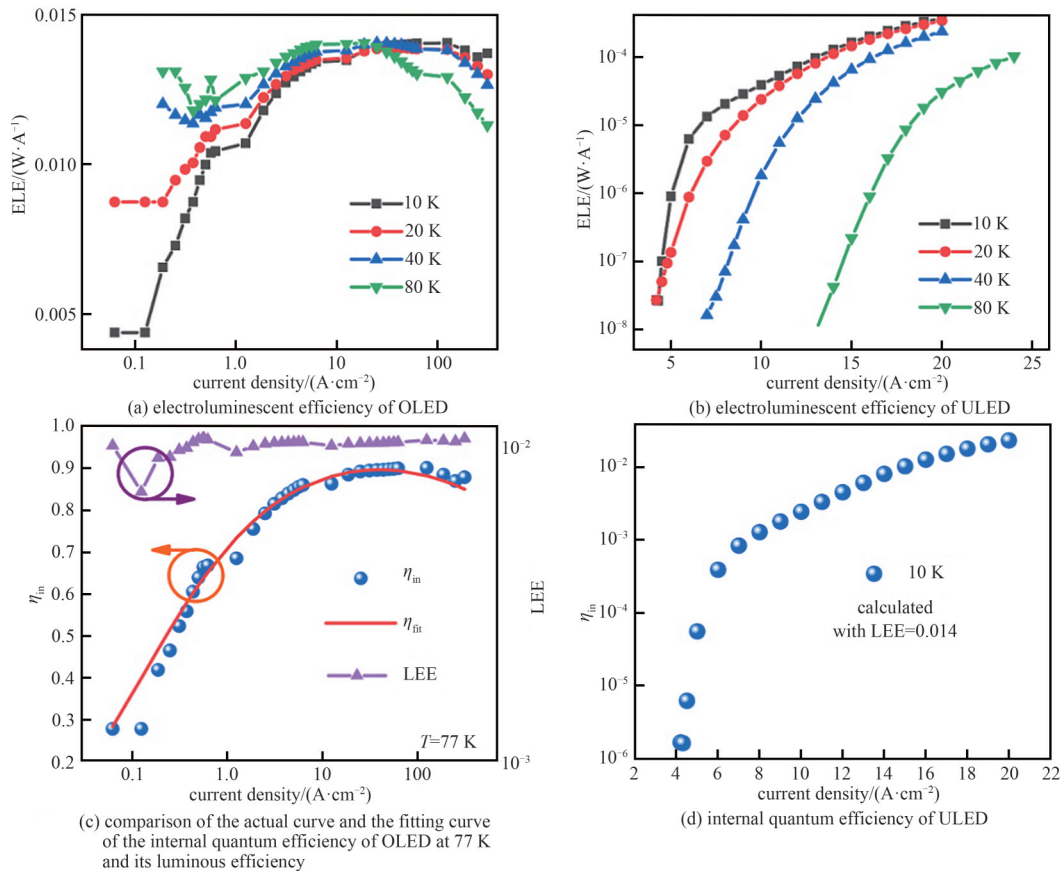


Fig.4 Comparison of the luminous efficiency of the two devices  
图4 两种器件发光效率对比

如图 5(b)所示，在相同的电场下，ULED 的 LED 复合区前存在一个势阱，这不仅会降低载流子注入效率，而且会导致复合区的载流子隧穿或跃迁到复合区外，产生光谱缺陷。同时，LED 复合区仅有 100 nm 的厚度，也在一定程度上影响器件的整体发光效率。反观 OLED，如图 5(d)所示，改进后的 OLED 复合区不仅更厚，且其复合区前后也具有势垒，这一结构对载流子有更好的局域性，进一步提升了这一区域电子与空穴浓度，从而提升了器件的辐射复合效率。但势垒增高也会导致载流子的注入效率降低，为削弱这一影响，引入 Al 组分渐变势垒。从结果看，ULED 复合区的复合速率约为  $2.85 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ ，而 OLED 的复合速率约为  $7.21 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ ，复合速率提升了 2 个数量级，这是优化后器件发光效率提升的主要原因。由于 QRIP-ULED 与 QRIP-OLED 器件中 QRIP 器件结构完全相同，则 LED 的特性直接决定了上转换器件性能，相应的平均上转换效率也会大幅提升。

综上所述，OLED 中辐射复合效率更高，而 ULED 中复合效率较低，主要是由于较薄的激活区无法有效捕获载流子，且较低的势垒难以有效限制载流子的流失。此外，OLED 通过提高激活区厚度和提升势垒高度，不仅提升了载流子的复合效率，还提高了光子提取效率。这些改进使 OLED 的平均内量子效率显著高于 ULED。在高效上转换成像器件的设计中，保证 LED 辐射复合效率的最大化是提高整体器件效率的关键，但 LED 相对的优化结构是否会切实提升器件上转换效率还有待进一步的验证，如 LED 势垒高度对于器件内部整体电势分布的影响也有待进一步的理论及实验论证，本文主要聚焦点为器件中 LED 的特性，着重分析采用 OLED 结构后，集成的上转换器件中 LED 的性能表现。

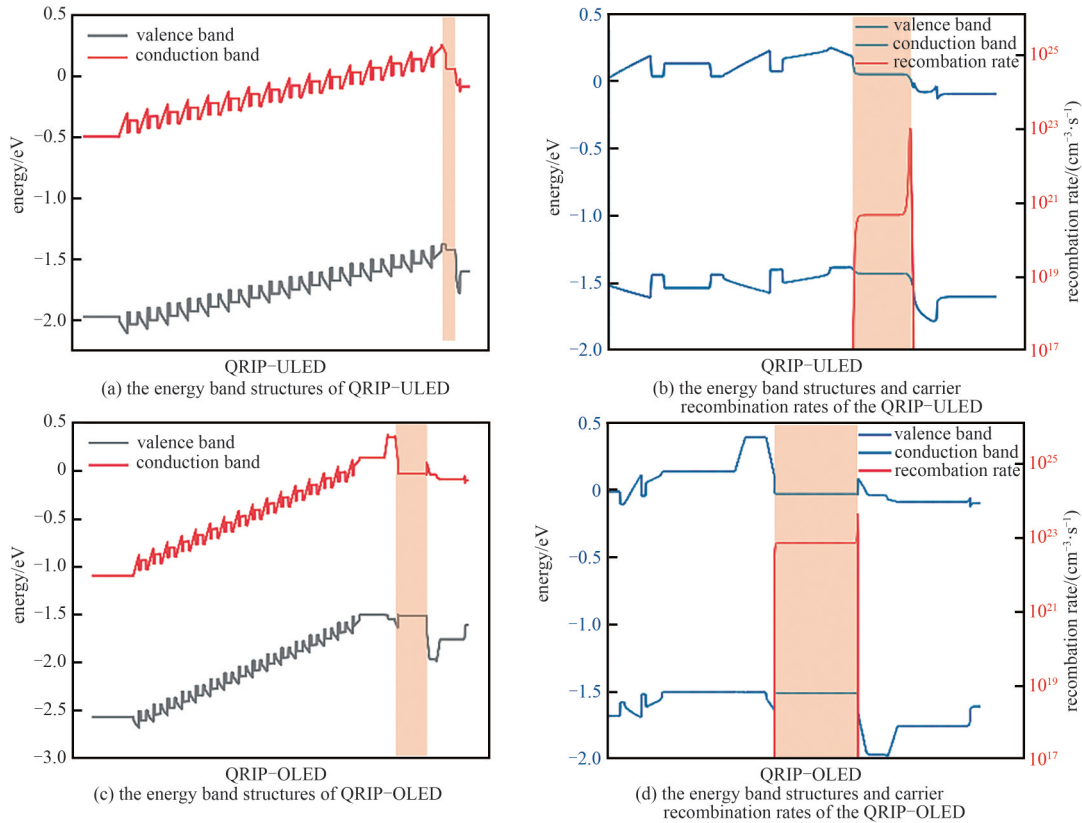


Fig.5 Comparison of the energy band structures and recombination rates of the two LEDs

图5 两种LED能带结构及复合速率对比

### 2.3 LED 电致发光均匀性

除发光效率外, LED的面发光均匀性也与其上转换特性息息相关。利用CCD相机进行LED器件发光均匀性评估, 图6(a)~(c)为ULED器件在温度为8 K时的表面发光图像。实验结果显示, ULED需要极大的电流( $\geq 40$  mA)驱动才会发光, 尽管随着驱动电流增大, 器件发光逐步增强, 但器件表现出极不均匀的面发光特性, 方形器件中仅有中间局部位置有发光, 而器件边缘与四周几乎没有发光表现。这一结果也进一步验证了ULED器件激活区辐射复合效率较低的特征。图6(d)~(f)为OLED器件在温度为8 K时的表面发光图像。不同于ULED, 器件在 $10 \mu\text{A}$ 电流驱动下即有明显发光, 当驱动电流增大到 $40 \mu\text{A}$ 时, 器件整个发光面均被点亮, 且具有很好的均匀性。这主要得益于优化的LED结构设计, 使器件激活区辐射复合效率大幅提升, 不仅提高了器件电致发光效率, 也大幅增加了器件表面发光均匀性。同时, OLED器件中存在一些局部很亮的“热点”(主要由局部小颗粒污染导致的低阻通道造成), 以往研究经验表明, 分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)生长的GaAs基LED中热点在深低温弱电流情况下无法避免, 这是由MBE材料生长技术特性决定的。实验室一般可采用飞秒烧蚀或精准定位结合干法刻蚀的方法消除热点。LED的面发光均匀性直接影响上转换成像器件的性能表现, 发光不均匀会使成像过程中不同区域的信号强度不一致, 进而影响整体图像的清晰度和精确度。由于材料缺陷和结构设计不合理造成ULED器件中局部发光不均匀现象, 同时也导致上转换图像质量下降。而OLED的优化结构设计, 确保了器件在低驱动电流下依然具备良好的发光均匀性, 这对于实现高质量的上转换成像至关重要。但需指出的是, 热点的存在并不影响LED优化结果, 从LED角度看, QRIP-OLED器件的上转换发光效率、光谱单色性以及上转换图像均匀性均有大幅提升。

表1统计并列出了本文与近年来国内外QWP-LED或QRIP-LED研究中, 器件LED工作温度、发光均匀性、外量子效率以及开启条件的对比。根据对比结果, 本文经过优化后的LED不仅有较高的工作温度、较大的外量子效率、较低的开启条件, 更有着很好的发光均匀性。

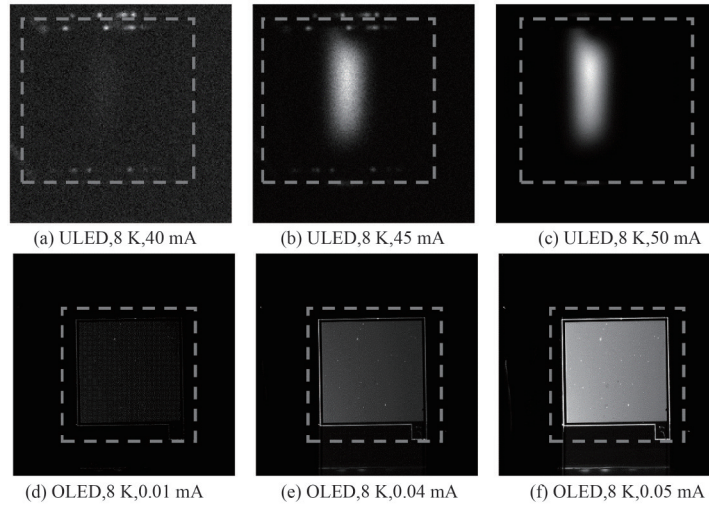
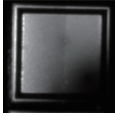

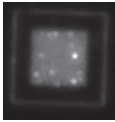
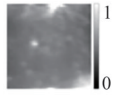
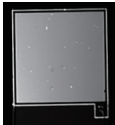


Fig.6 Photos of ULED and OLED luminous uniformity  
图6 ULED、OLED电致发光均匀性照片

表1 不同文献中LED器件比较

Table1 Comparison of LED in different papers

Ref.	operation temperature	uniformity	EQE	opening conditions
[18]	10 K		2.0%	1.65 V
[24]	4.5 K		2.3%	1.8 V
[31]	4.5 K		-	0.1 $\mu$ A
[32]	4.2 K		2.3%	1.55 V
this work	8 K		2.4%	0.01 mA

### 3 结论

本文系统地研究了 QRIP-LED 的器件性能，结果表明 QRIP-OLED 中 LED 的发光效率比 QRIP-ULED 器件中 LED 的发光效率高出 2 个数量级，LED 发射光谱更加规则，发射峰值波长更接近理论预期，并在低温、弱驱动电流下，QRIP-OLED 表现出极高的表面均匀性，这些特性意味着 QRIP-LED 在上转换效率和成像均匀性方面将有显著的提升。

#### 参考文献：

[ 1 ] ZOU W Q,VISSER C,MADURO J A,et al. Broadband dye-sensitized upconversion of near-infrared light[J]. Nature Photonics, 2012,6(8):560-564. doi:10.1038/nphoton.2012.158.



- [ 2 ] ZHAO J B, JIN D Y, SCHARTNER E P, et al. Single-nanocrystal sensitivity achieved by enhanced upconversion luminescence [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(10):729–734. doi:10.1038/nnano.2013.171.
- [ 3 ] WU D M, GARCÍA-ETXARRI A, SALLEO A, et al. Plasmon-enhanced upconversion[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2014, 5(22):4020–4031. doi:10.1021/jz5019042.
- [ 4 ] LIU Qian, FENG Wei, YANG Tianshe, et al. Upconversion luminescence imaging of cells and small animals[J]. *Nature Protocols*, 2013, 8(10):2033–2044. doi:10.1038/nprot.2013.114.
- [ 5 ] YANG Yining, ZHANG Yong, SHEN Wei, et al. Semiconductor infrared up-conversion devices[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2011, 35(4):77–108. doi:10.1016/j.pquantelec.2011.05.001.
- [ 6 ] XIE Xiaoji, LIU Xiaogang. Upconversion goes broadband[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(10):842–843. doi:10.1038/nmat3426.
- [ 7 ] VAN SARK W G, DE-WILD J, RATH J K, et al. Upconversion in solar cells[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2013, 8(1):81. doi:10.1186/1556-276X-8-81.
- [ 8 ] PFEIFFER T, KUTAS M, HAASE B, et al. Terahertz detection by upconversion to the near-infrared using picosecond pulses[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20):29419–29429. doi:10.1364/OE.397839.
- [ 9 ] KHAN M J, CHEN J C, KAUSHIK S. Optical detection of terahertz using nonlinear parametric upconversion[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(23):2725–2727. doi:10.1364/OL.33.002725.
- [ 10 ] BARH A, PEDERSEN C, TIDEMAND-LICHTENBERG P. Ultra-broadband mid-wave-IR upconversion detection[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(8):1504. doi:10.1364/OL.42.001504.
- [ 11 ] ALBOTA M A, WONG F N C. Efficient single-photon counting at 155  $\mu\text{m}$  by means of frequency upconversion[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13):1449. doi:10.1364/OL.29.001449.
- [ 12 ] AHARON A, ROZBAN D, KLEIN A, et al. Detection and upconversion of three-dimensional MMW/THz images to the visible[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6):306. doi:10.1364/PRJ.4.000306.
- [ 13 ] KOZINA M, FECHNER M, MARSIK P, et al. Terahertz-driven phonon upconversion in SrTiO<sub>3</sub>[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(4):387–392. doi:10.1038/s41567-018-0408-1.
- [ 14 ] BAI Peng, ZHANG Yueheng, SHEN Wenzheng. Infrared single photon detector based on optical up-converter at 1 550 nm[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):15341. doi:10.1038/s41598-017-15613-0.
- [ 15 ] DOWNES L A, MACKELLAR A R, WHITING D J, et al. Full-field terahertz imaging at kilohertz frame rates using atomic vapor[J]. *Physical Review X*, 2020, 10(1):011027. doi:10.1103/PhysRevX.10.011027.
- [ 16 ] BAN D, HAN S, LU Z H, et al. Near-infrared to visible light optical upconversion by direct tandem integration of organic light-emitting diode and inorganic photodetector[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(9):093108. doi:10.1063/1.2710003.
- [ 17 ] BAN D, LUO H M, LIU H C, et al. Midinfrared optical upconverter[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(20):201103. doi:10.1063/1.1921330.
- [ 18 ] FU Zhili, GU Lin, GUO Xiaogang, et al. Frequency up-conversion photon-type terahertz imager[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):25383. doi:10.1038/srep25383.
- [ 19 ] ALLARD L B, LIU H C, BUCHANAN M, et al. Pixelless infrared imaging utilizing a p-type quantum well infrared photodetector integrated with a light emitting diode[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(21):2784–2786. doi:10.1063/1.119058.
- [ 20 ] DUPONT E, BYLOOS M, GAO M, et al. Pixelless thermal imaging with integrated quantum-well infrared photodetector and light-emitting diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(2):182–184. doi:10.1109/68.980504.
- [ 21 ] LIU H C, ALLARD L B, BUCHANAN M, et al. Pixelless infrared imaging device[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(5):379. doi:10.1049/el:19970242.
- [ 22 ] DUPONT E, BYLOOS M, OOGARAH T, et al. Optimization of quantum-well infrared detectors integrated with light-emitting diodes[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 47(1/2):132–143. doi:10.1016/j.infrared.2005.02.018.
- [ 23 ] SCHNEIDER H, LIU H C. Quantum well infrared photodetectors[M]. Berlin:Springer, 2006. doi:10.1007/978-3-540-36324-8.
- [ 24 ] BAI Peng, ZHANG Yueheng, WANG Tianmeng, et al. Broadband THz to NIR up-converter for photon-type THz imaging[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1):3513. doi:10.1038/s41467-019-11465-6.
- [ 25 ] BAI Peng, ZHANG Yuhua, GUO Xiaogang, et al. Realization of the high-performance THz GaAs homojunction detector below the frequency of reststrahlen band[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(24):241102. doi:10.1063/1.5061696.
- [ 26 ] BAI Peng, LI Xiaohong, YANG Ning, et al. Broadband and photovoltaic THz/IR response in the GaAs-based ratchet photodetector[J]. *Science Advances*, 2022, 8(21):eabn2031. doi:10.1126/sciadv.abn2031.
- [ 27 ] LAO Y F, PERERA A G U, LI L H, et al. Tunable hot-carrier photodetection beyond the bandgap spectral limit[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5):412–418. doi:10.1038/nphoton.2014.80.

- [28] KARPOV S. ABC-model for interpretation of internal quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs: a review[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2015,47(6):1293-1303. doi:10.1007/s11082-014-0042-9.
- [29] PIPREK J. Efficiency droop in nitride-based light-emitting diodes[J]. *Physica Status Solidi(a)*, 2010,207(10):2217-2225. doi:10.1002/pssa.201026149.
- [30] RYU H Y, KIM H S, SHIM J I. Rate equation analysis of efficiency droop in InGaN light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2009,95(8):081114. doi:10.1063/1.3216578.
- [31] LI Xiaohong, PENG Bai, HUANG Siheng, et al. Bi-functional high-speed and ultrabroad bandwidth detector[J]. *ACS Photonics*, 2023,10(8):2816-2824. doi:10.1021/acsp Photonics.3c00513.
- [32] PENG Bai, ZHANG Yueheng, WANG Tianmeng, et al. Cryogenic characteristics of GaAs-based near-infrared light emitting diodes[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2020,35(3):035021-1-10. doi:10.1088/1361-6641/ab6dbf.

#### 作者简介：

韩尚杰(1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微纳光子学. email:Shangjie.Han@bupt.edu.cn.

王屹(1999-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为半导体红外及太赫兹探测器件及上转换器件物理研究.

王汉斌(1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为化合物半导体高精度微纳加工制备.

杨宁(1980-), 男, 博士, 特聘研究员, 主要从事半导体微纳结构光电特性基础研究.

楚卫东(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹量子级联激光器.

白鹏(1992-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为半导体红外及太赫兹探测器件及上转换器件物理研究.

(上接第 1072 页)

#### 作者简介：

张金铎(2000-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为长波光子探测与信号采集技术. email:zhangjd23@mails.tsinghua.edu.cn.

陈猛(1990-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为长波光子探测与光谱分析技术.

刘睿丰(1999-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为长波光子探测与光谱分析技术.

王迎新(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为长波光子探测与成像技术.