光电探测与调制技术专栏

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024022104

空间限制退火制备自供电 p-CuI/u-GaN 薄膜异质结蓝-紫光探测器研究

梁田泓[1,2]，吕军兴[1]，刘宁炀[2]，尉　俊[1]，陈志涛[2*]，宋伟东[1*]

（1. 五邑大学 应用物理与材料学院，广东 江门 529020；2. 广东省科学院半导体研究所，广州 510650）

摘　要： 自供电型光电探测器通过内建电场即可完成信号的探测，无需外加电源，具有低功耗、高灵敏度及快速响应等特点，引起了研究者的广泛关注。文章利用简易的真空热升华方法制备出高结晶度的 CuI 微米颗粒薄膜。进一步利用空间限制退火技术抑制了退火过程中 CuI 分子的纵向扩散，显著改善了薄膜的均匀性和致密性。通过构建 p-CuI/u-GaN 异质结，实现了具有自供电特性的蓝-紫光探测器。该探测器的响应范围为波长小于 420 nm 的蓝-紫光波段，在 360 nm 的紫外光波段具有大响应度（51 mA·W^{-1}）、高比探测率（6.1×10^{11} Jones）、较快响应速度（上升时间为 32 ms，衰减时间为 36 ms）及良好的稳定性。研究结果表明，采用热升华结合空间限制退火技术能够制备出高质量的 p-CuI 薄膜，p-CuI/u-GaN 异质结自供电蓝-紫光探测器为高性能半导体光电探测器件的制备提供了新的方法和途径。

关键词： 真空热升华法；空间限制退火；自供电；蓝-紫光探测器

中图分类号： TN23　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0700－07

Self-powered High-performance CuI/GaN Heterojunction Blue-UV Photodetector Prepared by Confined Space Annealing

LIANG Tianhong[1,2], LYU Junxing[1], LIU Ningyang[2], WEI Jun[1], CHEN Zhitao[2], SONG Weidong[1]

（1. School of Applied Physics and Materials, Wuyi University, Jiangmen 529020, CHN;
2. Institute of Semiconductors, Guangdong Academy of Science, Guangzhou 510650, CHN）

Abstract: Self-powered heterojunction photodetectors have attracted significant attention as they can detect signals driven by a built-in electric field without external power. They are characterized by low power consumption, high sensitivity, and a fast response speed. This study employs a simple vacuum thermal sublimation method to prepare highly crystalline CuI thin films. Additionally, a smooth and dense polycrystalline film is prepared by improving the smoothness and density using confined space annealing. By building a p-CuI/u-GaN heterojunction, self-powered blue-UV photodetectors are constructed. The device responds to the blue-UV light spectrum with wavelengths ＜ 420 nm and exhibits excellent performance, including high responsivity (51 mA/W^{-1}), high detectivity (6.5×10^{11} Jones), fast response times (approximately 32 ms rise time and 36 ms decay time), good stability at the 360 nm wavelength, and self-powering capabilities. This study provides a simple method for preparing high-quality semiconductor CuI films and offers new insights for the fabrication of high-

收稿日期：2024－02－21.

基金项目：广东省基础与应用基础研究基金项目（2020A1515110185，2023A1515011678）；广东省科学院打造综合产业技术创新中心行动资金项目（2023GDASZH-2023030601-02）.

* **通信作者：**宋伟东，陈志涛

performance photodetectors.

Key words： thermal sublimation； confined space annealing； self-powering； blue-UV detector

0 引言

光电探测器通过光电效应将光信号转换成电信号，用于探测不同波段的光信号或监测辐射剂量。其中，蓝-紫光光电探测器在火焰探测、紫外线杀菌、半导体光刻、环境监测、区域高保密通信、光谱分析以及同步辐射等领域具有广泛的应用前景[1-3]。异质结自驱动光电探测器通过自建电场对光生载流子高效分离，因此无需额外的外接电源[4-6]。因其结构简单、灵敏度高、热稳定好，特别是无需外加电源的自供电特性，在高性能探测器领域展现出巨大的潜力[7-8]。

碘化铜(CuI)是一种由无毒且储量丰富的元素构成的二元金属卤化物半导体材料，锌矿结构的 γ-相 CuI 具有天然缺陷铜空位(V_{Cu})，能够在价带最大值(VBM)上方形成具有低形成能的浅受体态。同时，由于其低的空穴有效质量，γ-相 CuI 薄膜具有高的空穴迁移率。由于这些特点，γ-CuI 薄膜表现出高空穴浓度、高空穴迁移率以及高电导率的特点[9-10]。此外，γ-相 CuI 还具有宽的直接带隙(3.1 eV)以及大的激子结合能(62 meV)，被认为是光电应用领域有前景的材料，特别是在短波长光电探测器和发光器件方面[11]。由于优异的物理化学性质，CuI 薄膜已被用于透明导电薄膜、光伏电池、发光二极管、热电器件和光电探测器等领域。为了进一步推动工业应用，开发低成本高质量 CuI 薄膜的制备方法是必要的[12]。

目前，制备 CuI 半导体薄膜[13]主要方法有铜膜碘化法、溶液法和气相沉积法等。铜膜碘化法将沉积的铜薄膜置于含有碘蒸汽的环境中，基于铜膜与碘直接化学反应生成 CuI 薄膜，该方法生成的薄膜存在表面粗糙、成分不均匀、结晶性能差等问题[14]。溶液法合成 CuI 薄膜具有成本效益，但与铜膜碘化法存在类似的薄膜质量问题[15]。气相沉积法可以制备较高质量的 CuI 薄膜，但需要昂贵的仪器和较长的制备时间，且制备过程容易引起腔室污染问题[16-17]。为兼顾制备成本与薄膜质量，本文利用 CuI 材料在超过 300 ℃下易升华的物理特性成功地改进了气相沉积工艺，采用简易的真空热台和机械泵构成的装置，由热升华法制备出了 CuI 微米颗粒薄膜。针对微米颗粒薄膜表面粗糙和致密性差的问题，通过空间限制退火方法改善薄膜的粗糙性和致密性，最终制备出了高结晶性且表面平整致密的纯相 γ-CuI 多晶薄膜。在此基础之上，构建了 p-CuI/u-GaN 异质结蓝-紫光探测器。实验结果表明，该器件具有出色的探测性能，在零偏压下，器件在 360 nm 光波段处具有大响应度(51 mA·W^{-1})、高比探测率(6.5×10^{11} Jones)、快响应速度(上升时间为 32 ms，衰减时间为 36 ms)和良好的稳定性。自供电特性和优异的光电性能使 p-CuI/u-GaN 异质结蓝-紫光探测器具有良好的应用潜力。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

采用金属有机化学气相沉积系统在蓝宝石衬底上外延生长非故意掺杂的 GaN 薄膜(u-GaN)，膜厚为 4～5 μm，背景电子浓度约为 2.7×10^{16} cm^{-3}。采用阿拉丁公司生产纯度为 98%的 CuI 粉末作为真空升华源料。所用的简易真空装置主要由真空热台和机械泵构成，机械泵可将真空热台抽至 3 Pa 左右，真空热台可升温至最高 450 ℃。真空热台内部放置有小尺寸石墨坩埚(内径为 1 cm，高度为 2 mm)，石墨坩埚用于放置待沉积的 CuI 粉末，制备 CuI 薄膜时先在石墨坩埚顶部放置 1 片空心氧化锆陶瓷圆片(直径为 1 cm，厚度为 1 mm)，随后在陶瓷圆片顶部放置待沉积的 GaN 基片(氧化锆陶瓷片用于在坩埚与基片之间隔热)。

1.2 热升华法制备 CuI 薄膜

将长度为 5.08 cm GaN 晶圆切割成边长为 1.2 cm 的正方形小片，依次在丙酮、异丙醇、乙醇中超声清洗，随后用去离子水冲洗，最后用氮气吹干后备用。先取 0.5 g CuI 粉末均匀地平铺在前述石墨坩埚内，将 1 片陶瓷片置于石墨坩埚顶部，再将 GaN 基片背面向上置于陶瓷片上方，最后将上述整体置于真空热台内。打开机械泵，抽真空至 5 Pa 后，将真空热台升温至 400 ℃，保温 20 min；随后关闭加热待真空热台冷却至室温，关闭机械泵，最后取出样品。其他温度下制备的样品仅温度参数不同，

其余变量和条件均相同。

1.3 空间限制退火制备平整致密的 CuI 薄膜

先将沉积 CuI 薄膜的 GaN 基片背面向上置于硅片上方，硅片表面有一层自然氧化的 SiO_2 薄膜，再将上述样品整体置于真空热台内部。打开机械泵，抽真空至 5 Pa 后，将真空热台升温至 250 ℃，保温 120 min。随后关闭加热待真空热台冷却至室温，关闭机械泵，最后取出样品。

1.4 器件制备

先在 GaN 基片上取一小块裸露的表面涂抹一层 InGa 合金，形成欧姆接触，再通过热蒸发法在 CuI 表面沉积厚度为 5 nm 的金。

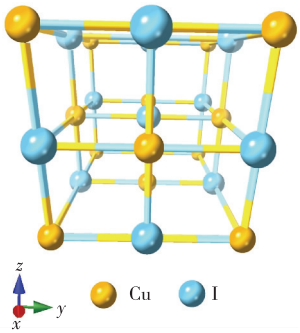
1.5 表征和测试

采用电子扫描显微镜(Nova Nano SEM430)对薄膜材料的微观形貌进行表征。使用 Bruker D8 (λ=0.154 05 nm)X 射线衍射仪(XRD)进行物相分析。采用可见光紫外分光光度计(紫外-3600 plus)测试薄膜吸收谱。采用紫外光电测试系统(SCS10-EQ99-DSR)对器件的光电性能进行测试。所有测量均在室温环境下进行。

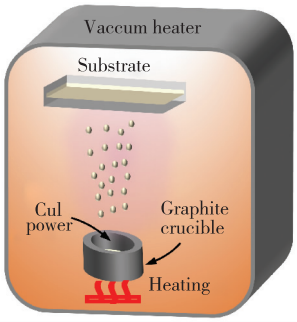
2 结果与讨论

2.1 γ-CuI 薄膜的制备

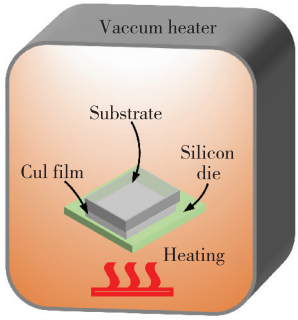
图 1(a)为 CuI 的 γ 相(闪锌矿)晶体结构示意图，CuI 有三种晶相：α-相、β-相和 γ-相，其中只有 γ-相结构的 CuI 为半导体材料。据文献[18]报道，γ-CuI 为 P 型半导体材料，其导电性来源于 I 空位缺陷。图 1(b)为采用简易真空装置热升华法制备 CuI 微米颗粒薄膜的示意图。真空热台用于提供低真空度和加热温度，实验时 CuI 粉末均匀地平铺于石墨坩埚内部，受热后升华，在衬底表面沉积成薄膜。图 1(c)为利用空间限制退火改善薄膜均匀性和致密性的示意图。将 CuI 薄膜倒放在硅片表面，薄膜受热后 CuI 分子发生迁移，由于纵向迁移受到硅表面 SiO_2 薄膜的阻挡，薄膜受热后 CuI 分子将主要进行横向迁移，晶粒尺寸增大，薄膜表面均匀性和致密性得以改善。



(a) CuI 的 γ 相晶体结构示意图



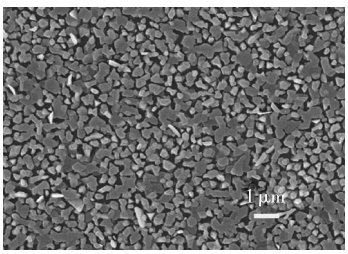
(b) 热升华法制备 CuI 微米颗粒薄膜示意图



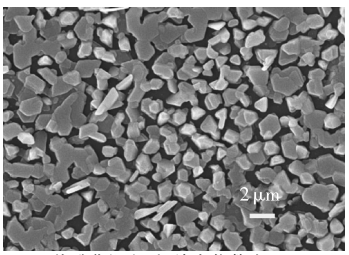
(c) 空间限制退火处理 CuI 微米颗粒薄膜示意图

图 1 CuI 薄膜的制备工艺

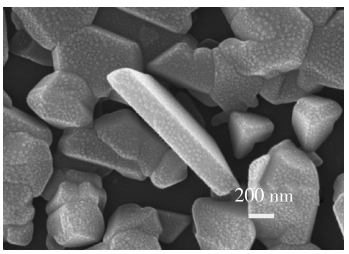
图 2(a)～(c)为采用热升华法制备的 CuI 薄膜在不同放大倍数下的 SEM 图，样品对应的制备条件为加热温度为 400 ℃，沉积时间为 20 min。从图中可以看出，热升华法在基片表面沉积了一层主要由三角形和六方形 CuI 微米晶粒组成的薄膜，整体较为均匀，但进一步放大后发现薄膜致密性较差、表面较为粗糙。这可能是热升华法沉积工艺造成的，尽管有氧化锆陶瓷片隔热，但基片仍有较高的温度。较高的基底温度为晶体生长提供了能量，有利于晶体生长，从而形成了一层由 CuI 微米晶粒组成的薄膜，最终导致薄膜表面变粗糙、致密性变差[19]。图 2(d)～(f)为退火后样品在不同放大倍数下的表面形



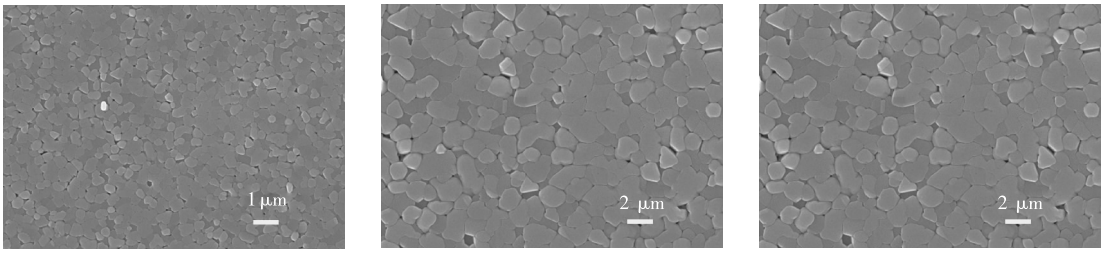
(a) 热升华沉积后，放大倍数为 5 000×



(b) 热升华沉积后，放大倍数为 10 000×



(c) 热升华沉积后，放大倍数为 50 000×

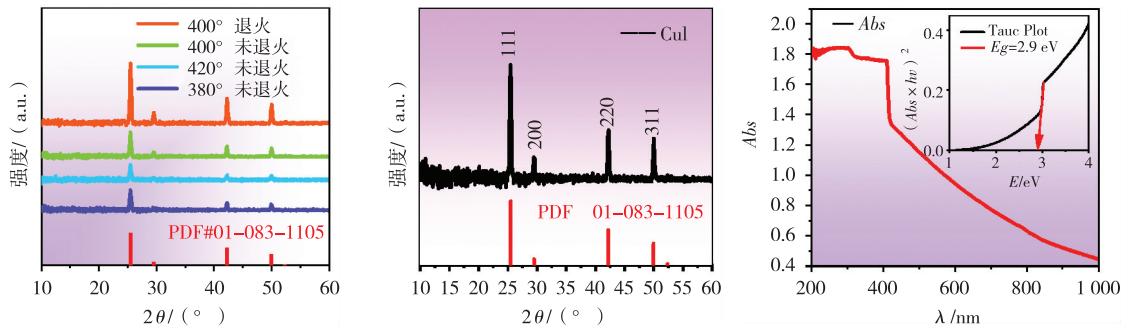


(d) 热退火处理后，放大倍数为 5 000×　(e) 热退火处理后，放大倍数为 10 000×　(f) 热退火处理后，放大倍数为 50 000×

图 2　CuI 薄膜的表面形貌表征

貌 SEM 图，对应的样品在热升华法的基础上进行了 250 ℃温度下 120 min 空间限制退火。从图中可以看出，薄膜由三角形和六方形的混合 CuI 微米晶粒转变为更大尺寸的六方形的 CuI 晶粒。通过空间限制退火，晶体分子纵向迁移受到 SiO_2 的物理阻挡，因此，薄膜在退火过程中主要进行横向的晶粒再生长。经过两个小时空间限制退火，最终形成了 400～700 nm 的大尺寸六方晶粒，CuI 薄膜表面平整度及致密性显著提高。

为了分析不同升华温度和 400 ℃退火前后薄膜的组成结构，对薄膜进行了 XRD 测试，并通过标准卡片(PDF＃01-083-1105)进行对照。图 3(a)和图 3(b)为 4 组样品的 XRD 扫描曲线，分别对应于 380，400 和 420 ℃下热升华制备的 CuI 薄膜(未退火)，以及 400 ℃热升华后退火的样品。结果显示，在不同温度制备的样品中，在 400 ℃热升华制备的 CuI 薄膜的衍射峰最强，说明在 400 ℃时样品的结晶性最好。同时，样品经退火后衍射峰强度进一步增强，说明退火过程有利于晶体的生长。所有样品均呈现 γ-CuI 的衍射峰，未出现 α-相和 β-相 CuI 的峰，也未出现 Cu 和 CuO 的峰或其他杂质的峰，这表明所制备的样品为纯相 γ-相 CuI 薄膜。样品主要呈现 4 个衍射峰，其中，25.5°的峰位对应的(111)晶面，29°的峰位对应的(200)晶面，44°的峰位对应的(220)晶面，50°的峰位对应的(311)晶面，这表明所制备的样品为多晶薄膜。



(a) CuI 薄膜样品的 XRD 衍射谱　(b) 退火后 CuI 薄膜样品的 XRD 衍射谱　(c) CuI 薄膜样品的吸收光谱

图 3　CuI 薄膜结构表征

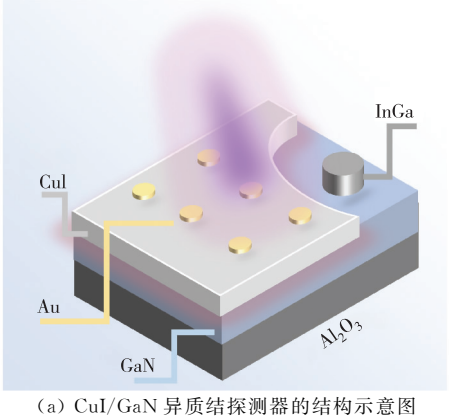
禁带宽度是半导体薄膜的关键参数，可通过光谱吸收曲线结合 Tauc Plot 法计算得出[20]。图 3(c)为 CuI 薄膜的吸收曲线，曲线显示样品在约 420 nm 波段的位置出现了陡峭的吸收边，这表明 γ-CuI 具有直接带隙的特性。如图 3(c)的内插图所示，根据 Tauc Plot 法得出的带隙值为 2.9 eV，与文献[21]报道基本一致。

2.2　p-CuI/u-GaN 异质结蓝-紫光探测器

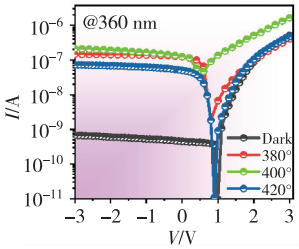
本实验将高质量纯相 γ-相 p-CuI 半导体薄膜与 u-GaN 构建为 p-n 型异质结蓝-紫光探测器，并研究其光电性能。图 4(a)为 CuI/GaN 异质结探测器的结构示意图，其中具有低功函数的 InGa 电极作为负极，用于与 u-GaN 形成欧姆接触，具有高功函数的 Au 电极作为正极用于与 p-CuI 形成欧姆接触。如图 4(b)所示，在无光照的条件下，器件在正向偏压超过 1 V 时导通，在反向偏压下截止。在 360 nm 紫外光照射条件下，正向电流缓慢增大，反向电流则迅速增大(增大约两个数量级)，表现出显著的紫外光响应。当偏压为 0 V 时，光电流比暗电流高约两个数量级，且暗电流已接近饱和，因此，器件具有明显的自供电特性。从图 4(b)中可以看出，400 ℃制备的器件光电流最大，380 ℃时光电流轻微下降，而

420 ℃时光电流显著下降。图 4(c)为 400 ℃制备的器件在退火前后的 *I-V* 特性曲线，Light1 为退火前的光电流曲线，Light2 为退火后的光电流曲线。从图中可以看出，退火后的样品在 360 nm 的紫外光照射下光电流显著增大，在 0 V 时光电流提升了约 6 倍。可能的原因是：在未退火之前，由于 CuI 晶粒不连续，电流的横向传输受到严重限制，在 CuI 一侧产生的光生载流子在收集过程，晶粒表面大量复合；而退火后，CuI 薄膜变得连续且致密，从而使光生载流子可以被更有效地收集，进而使器件的反向电阻大幅降低。

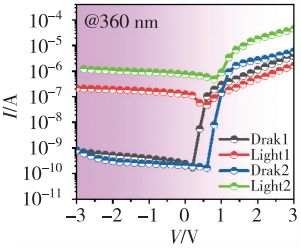
通过能带结构可以对器件的光电特性进行定性解释。如图 4(d)所示，CuI 和 GaN 的电子亲和能分别为 2.1 和 4.1 eV，带隙(E_g)分别为 2.9 和 3.4 eV[21]。如图 4(e)所示，CuI/GaN 异质结形成的自建电场可以高效地分离光生电子-空穴对，是蓝-紫光探测器自供电的驱动力。当入射光的光子能量低于 2.9 eV 时，器件内部发生非本征吸收，产生微量的光生载流子；当入射光的单光子能量超过 2.9 eV 时，发生本征吸收，器件内部生成大量的光生载流子。非耗尽区产生的光生电子-空穴对会被迅速复合；空间电荷区域内的光生电子-空穴对则在自建电场的作用下迅速分开，空穴移向 p 区，电子移向 n 区，分别由负电极和正电极收集，然后通过外部电路进行复合，最终实现光电探测器的自供电功能[22]。



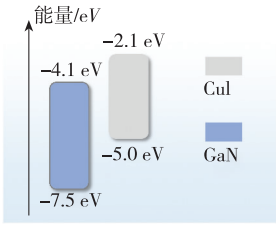
(a) CuI/GaN 异质结探测器的结构示意图



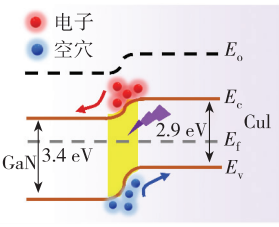
(b) 探测器在紫外光下和黑暗中，制备温度从 380°到 420°时的 *I-V* 曲线



(c) 探测器退火前后在紫外光和黑暗条件下的 *I-V* 曲线



(d) CuI 和 GaN 的能带结构示意图



(e) 在紫外光照射和 0 V 偏压下的光探测器能带结构示意图

图 4 蓝-紫光探测器 *I-V* 特性曲线与器件原理分析

为进一步评估 CuI 薄膜经过退火后器件的光电性能，研究了不同光功率密度下的器件光响应，对应的 CuI 制备温度为 400 ℃。如图 5(a)所示，在 0 V 偏置、连续光照的条件下，当入射光功率密度从 88 增加到 1 460 μWcm^{-2} 时器件的光电流稳定增加，说明探测器在自供电模式下能有效、稳定工作。提取光电流作为入射光功率密度的函数，如图 5(b)所示，可以看到光电流对光功率密度展现出良好的线性依赖性。受限于测试设备的最大光功率密度，在测试范围内光产生载流子的效率未出现饱和现象。

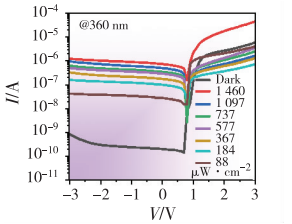
图 5(c)和(d)展示了不同波长下器件的光电流、响应度(*R*)、外量子效率(*EQE*)和比探测率(D^*)的参数特性。如图 5(c)所示，当光照波长大于 420 nm 波段时，光电流趋向于零，接近 420 nm 时，光电流迅速增加至 0.25 μA，在 370～420 nm 波段光电流保持稳定。此外，在 360～370 nm 波段光电流再次迅速上升，在 360 nm 波段电流达到最大值 0.75 μA，然后，随着波长的减小而下降。

测试器件在不同波段发出光束的光功率不同，因此相较于光电流曲线，光谱响应曲线可以更好地描述器件对特定波长的响应情况。响应度定义为 $R=I_{ph}/(P_{in}S)$，即单位光功率输出的光电流，其中，I_{ph} 为光电流，P_{in} 为光输出功率密度，S 为有效结区域面积(约为 1 mm^2)。如图 5(c)所示，在入射光波长大于 420 nm 的波段，器件的响应度趋向于零，此时器件中主要发生非本征吸收而无法生成光生载流子，器件响应度趋向于零；在 420 nm 波段附近，器件的响应度迅速增加至 15 $mA \cdot W^{-1}$，此波段的光子能量对应于 CuI 的带隙值；在 370～420 nm 波段，光子在 CuI 一侧发生本征吸收引起器件的响

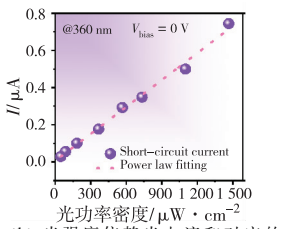
应；365 nm 波段对应 GaN 的带隙值，器件的响应度达到最大值－51 mA·W^{-1}；在低于 360 nm 波段，器件的响应度逐渐降低，主要缘于紫外光在传输途中被非耗尽区强烈吸收，非耗尽区内产生的光生载流子难以被有效分离，导致到达耗尽区的能量减少，最终导致器件的响应度随波长增大而减小[23]。

器件的外量子效率（*EQE*）可以定义为 $EQE=I_{ph}hc/(e\lambda P_{in})$，其中，参数 h，λ 和 c 分别为普朗克常数、入射光波长和光速，描述的是收集到的载流子数和入射光子数的比值。如图 5(d)所示，在 360 nm 处，器件的 *EQE* 峰值为 15%。当限制光电探测器探测能力的主要噪声为暗电流的散粒噪声时，则可以用比探测率 D^* 来衡量一个器件探测弱光的能力[24]，比探测率定义为 $D^*=R/(2eI_{Dark}/S)^{1/2}$。如图 5(d)所示，在 360 nm 波段比探测率值最高，峰值为 6.5×10^{11} Jones。该器件在自供电工作状态下，对 360 nm 波段的信号具有最佳的探测性能，对 360 nm 波段的信号分别具有 51 mA·W^{-1} 的响应度、15% 的外量子效率和高达 6.5×10^{11} Jones 的比探测率值，具有优异的探测性能。

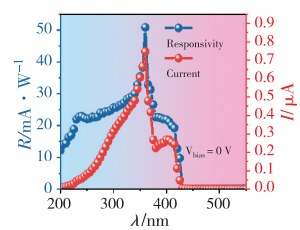
图 5(e)～(g)是器件自供电模式下的响应速度、重复性以及稳定性的相关数据。如图 5(e)所示，在 360 nm 脉冲光激励下，光电流从 10%到 90%的上升时间为 32 ms，从 90%到 10%的衰减时间为 36 ms。这表明探测器在自供电模式下依旧具有较快的响应速度。在 360 nm 紫外光照射下，测试了不同功率下 5 个周期的光电流。如图 5(f)所示，随光功率密度由 173 增加至 1 323 μW·cm^{-2}，光电流由0.1增加至0.63 μA，此过程中电流波形保持稳



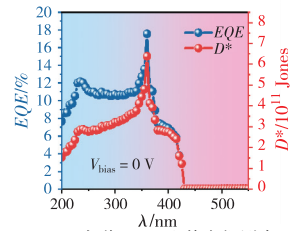
(a) 紫外光功率依赖 *I-V* 特征曲线



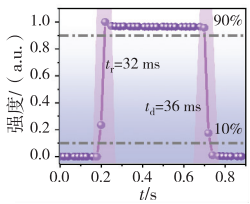
(b) 光强度依赖光电流和对应的线性拟合曲线



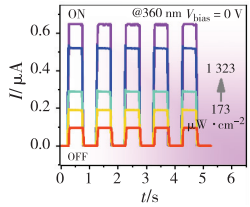
(c) 光谱光电流和响应度特征



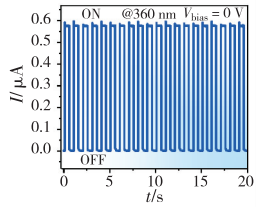
(d) 光谱 *EQE* 和特定探测率



(e) 光探测器的 τ_r 和 τ_d 估值



(f) 紫外光功率依赖 *I-t* 特征曲线



(g) 紫外光时间依赖 *I-t* 特征曲线

图 5 p-GaN/u-CuI 异质结蓝-紫光探测器器件性能的详细测试

定。与时间相关的光电流数据如图 5(g)所示，在经过 20 个周期的光照后，光电流波形仍保持稳定、可重复。因此，在无外加电源的条件下，该器件的动态响应具有良好的稳定性和再现性。

3 结论

本文在 5 Pa 的真空环境、400 ℃保温 20 min 的条件下，通过热升华法制备出了高结晶度的纯相 γ-相 CuI 薄膜。利用空间限制退火技术抑制了退火过程中 CuI 分子的纵向扩散，显著改善了薄膜的均匀性和致密性。构建 p-CuI/u-GaN 异质结蓝-紫光探测器，该器件具有自供电的特性和优异的探测性能。在零偏压的条件下，器件在 360 nm 光波段处具有大的响应度（51 mA·W^{-1}）、高的比探测率（6.5×10^{11} Jones）、较快的响应速度（上升时间为 32 ms，衰减时间为 36 ms）和良好的稳定性。自供电的特性、优异的探测性，将使器件非常适合于实用的光探测。这种利用热升华及空间限制退火技术制备高质量半导体薄膜的方法，为高性能半导体光电器件的制备提供了新的思路和途径。

参考文献：

[1] Jia L, Zheng W, Huang F. Vacuum-ultraviolet photodetectors [J]. Photoni X, 2020, 1: 1-25.

[2] Li Z, Yan T, Fang X. Low-dimensional wide-bandgap semiconductors for UV photodetectors [J]. Nature Reviews Materials, 2023, 8(9): 587-603.

[3] Su L, Yang W, Cai J, et al. Self-powered ultraviolet photodetectors driven by built-in electric field [J]. Small, 2017, 13(45): 1701687.

[4] Song W, Chen J, Li Z, et al. Self-powered MXene/GaN van der Waals heterojunction ultraviolet photodiodes with superhigh efficiency and stable current outputs[J]. Adv. Mater., 2021, 33(27): e2101059.

[5] Wang Y, Ding K, Sun B, et al. Two-dimensional layered material/silicon heterojunctions for energy and optoelectronic applications[J]. Nano Res., 2016, 9(1): 72-93.

[6] Zhang Y, Liu W, Liu Y, et al. Directly written DPP-DTT/$SrTiO_3$ organic/inorganic heterojunctions for anisotropic self-powered photodetectors[J]. J. Mater. Chem. C, 2021, 9(43): 15654-15661.

[7] Al Fattah M F, Khan A A, Anabestani H, et al. Sensing of ultraviolet light: A transition from conventional to self-powered photodetector[J]. Nanoscale, 2021, 13(37): 15526-15551.

[8] Zhang Y, Song W. High performance self-powered CuZnS/GaN UV photodetectors with ultrahigh on/off ratio (3×108)[J]. J. Mater. Chem. C, 2021, 9(14): 4799-4807.

[9] Cao N, Zhang L, Li X, et al. Self-powered deep ultraviolet photodetector based on p-CuI/n-$ZnGa_2O_4$ heterojunction with high sensitivity and fast speed[J]. Opt. Express, 2024, 32(7): 11573-11582.

[10] Hartl H, Ostrikov K, Macleod J. Versatile, rapid, and plasma-assisted synthesis of cuprous halide composites at room temperature and pressure[J]. Adv. Mater. Technol., 2021, 7(4): 2100509.

[11] Liu A, Zhu H, Kim M G, et al. Engineering copper iodide (CuI) for multifunctional p-type transparent semiconductors and conductors[J]. Adv. Sci. (Weinh), 2021, 8(14): 2100546.

[12] Liu Y, Zhang T, Shen L, et al. Self-powered flexible ultraviolet photodetectors based on CuI/a-ZTO heterojunction processed at room temperature[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2023, 15(24): 29267-29277.

[13] Grundmann M, Schein F-L, Lorenz M, et al. Cuprous iodide-a p-type transparent semiconductor: history and novel applications[J]. Phys. Status Solidi A, 2013, 210(9): 1671-1703.

[14] Wang M, Wei H, Wu Y, et al. Highly transparent and conductive γ-CuI films grown by simply dipping copper films into iodine solution[J]. Phys. B: Condensed Matter, 2019, 573: 45-48.

[15] Inudo S, Miyake M, Hirato T. Electrical properties of CuI films prepared by spin coating[J]. Phys. Status Solidi A, 2013, 210(11): 2395-2398.

[16] Zi M, Li J, Zhang Z, et al. Effect of deposition temperature on transparent conductive properties of γ-CuI film prepared by vacuum thermal evaporation[J]. Phys. Status Solidi A, 2015, 212(7): 1466-1470.

[17] Xiang G, Zhang J, Yue Z, et al. High storage and operational stability self-powered UV photodetector based on p-CuI/n-GaN heterojunction prepared by thermal evaporation method[J]. Appl. Surf. Sci., 2023, 640: 158397.

[18] Yang Z, Wang M, Ding J, et al. Semi-transparent ZnO-CuI/CuSCN photodiode detector with narrow-band UV photoresponse[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2015, 7(38): 21235-21244.

[19] Zhang M, Zhu J, Yang B, et al. Oriented-structured CsCu(2)I(3) film by close-space sublimation and nanoscale seed screening for high-resolution X-ray imaging[J]. Nano Lett., 2021, 21(3): 1392-1399.

[20] Zhou Z, Zhao F, Wang C, et al. Self-powered p-CuI/n-GaN heterojunction UV photodetector based on thermal evaporated high quality CuI thin film[J]. Opt. Express, 2022, 30(16): 29749-29759.

[21] Wang J, Li J, Li S-S. Native p-type transparent conductive CuI via intrinsic defects[J]. J. Appl. Phys., 2011, 110(5): 054907.

[22] Li L, Liu Z, Wang L, et al. Self-powered GaN ultraviolet photodetectors with p-NiO electrode grown by thermal oxidation[J]. Mater. Sci. Semicond. Process., 2018, 76: 61-64.

[23] Li Y, Shi Z, Liang W, et al. Highly stable and spectrum-selective ultraviolet photodetectors based on lead-free copper-based perovskites[J]. Mater. Horiz., 2020, 7(2): 530-540.

[24] Song W, Liu Q, Chen J, et al. Interface engineering Ti(3)C(2) MXene/silicon self-powered photodetectors with high responsivity and detectivity for weak light applications[J]. Small, 2021, 17(23): e2100439.

作者简介：

梁田泓(1997—)，男，硕士，主要研究方向GaN基材料与器件；

宋伟东(1990—)，男，副教授，博士，主要研究方向为光电材料与器件；

陈志涛(1979—)，男，教授级高级工程师，博士，主要研究方向为第三代半导体材料与器件。