

变势垒甚长波红外量子级联探测器

黎昆[†], 巴赛, 谢添乐, 周立平, 杨宇

(中国电子科技集团公司第四十八研究所, 湖南 长沙 410000)

摘要: 针对现阶段甚长波量子级联探测器仅可在液氮温区工作、工作温度低、应用成本高昂的技术瓶颈, 本文设计并制备了一种 14 μm 波段变势垒量子级联探测器。该器件采用变势垒结构, 增强器件吸收强度, 在吸收区有效阻挡激发态电子的热泄露, 并在抽取区采用双阱耦合能级对激发态电子抽取, 提升抽取效率, 综合提高器件响应率。最终实现了 14 微米器件液氮温度下 32mA/W 的峰值响应率, 探测率 $1.7 \times 10^9 \text{ cmW}^{-1} \text{ Hz}^{1/2}$, 在外加 1.75V 的偏压下, 器件在液氮温度下的峰值响应率提高到 121mA/W, 探测率达到 $2.6 \times 10^9 \text{ cmW}^{-1} \text{ Hz}^{1/2}$, 成功将 14 微米量子级联探测器工作温度提升到液氮温度。

关键词: 甚长波红外, 量子级联探测器, 变势垒, 响应率

PACS: 07.57.-c, 07.57.Hm, 07.57.Ty

[†] 黎昆.E-mail:2370232410@qq.com

1 引言

量子级联探测器 (Quantum Cascade Detector、QCD) 是一种子带间光伏型探测器^[1], 光生电子是在 QCD 能带中的内建电场下发生定向输运, 器件工作时无需外加电压^[2-6], 消除了外加电场造成的暗电流的影响, 器件工作时噪声仅来源于热噪声, 理论上具备相对较高的工作温度。同时 QCD 依靠电子在导带内的子带间跃迁形成光响应, 是一种单极性器件, 器件的响应波谱窄, 在特种气体检测^[7,8]方面具备独特优势。但是当器件波长拓展到长波甚长波时, 子带间跃迁能量降低, 热噪声对于器件工作温度的影响进一步提升, 导致目前甚长波 QCD

器件只能在液氮温度工作，且器件的响应率及探测率相对较低，器件应用成本较高。

为改善甚长波 QCD 的响应率、探测率与工作温度等关键性能，国内外研究团队通过优化器件结构开展了大量研究，取得了系列阶段性成果。2019 年，有研究在器件弛豫区引入小能量台阶结构，通过延长 QCD 周期长度、提升器件电阻的方式优化器件工作温度，基于该结构的 19 μm 波段器件在 15 K 温度下实现 2.34 mA/W 的峰值响应率^[9]；2022 年，研究人员在器件吸收区采用双阱耦合结构以提升光响应能力，研制的 14 μm 波段器件在液氮温度条件下获得 4 mA/W 的响应率^[10]；2024 年，通过在吸收区引入斜跃迁微带耦合结构优化跃迁效率，16 μm 波段器件在 10 K 环境下实现了 11 mA/W 的响应率，器件光电响应性能得到有效提升^[11]。

为进一步突破甚长波 QCD 的性能瓶颈，本文提出一种新型变势垒结构并应用于器件有源区。该结构在单个器件周期内采用双组分 AlGaAs 势垒设计，其中吸收区选用低 Al 组分势垒结构，可有效增大电子跃迁矩阵元、提升光吸收效率；弛豫区则采用高 Al 组分高势垒结构，有效抑制激发态电子的热泄漏效应，提升基态载流子浓度。同时，在弛豫区引入耦合双阱结构辅助电子抽取，大幅提升电子抽取效率。测试结果表明，该新型结构器件在零偏压、80 K 工作温度下可实现 32 mA/W 的超高响应率，相较于同波段 QCD 器件性能提升一个数量级^[10]。弛豫区的高 Al 组分势垒能够有效阻隔吸收区光生电子通过热激活途径向连续态泄漏，显著提升器件电阻与探测性能，最终使器件在液氮温度下实现 $1.7 \times 10 \text{ cmW}^{-1} \text{Hz}^{1/2}$ 的探测率，成功将甚长波器件工作温度由液氮温度提高到液氮温度。此外，对器件施加 1.75 V 偏压后，其峰值响应率可进一步提升至 121

mA/W，较现有同波长光子探测器报道性能提升一个数量级^[10]，对应探测率可达 $2.6 \times 10 \text{ cmW}^{-1} \text{ Hz}^{1/2}$ ，可有效满足低温环境下高响应探测的应用需求。

2 结构设计

图 1 为 14 μm 波段变势垒 QCD 单周期导带子带结构示意图。该器件整体采用 GaAs 阱层与 AlGaAs 势垒层的经典材料体系，同时通过差异化 Al 组分势垒设计实现变势垒结构特性。其中，吸收区势垒采用低 Al 组分的 $\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ ，对应势垒高度为 128 meV，弛豫区势垒采用高 Al 组分的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ ，对应势垒高度为 279 meV^[12]，各层厚度依次为：6，9.2，8.9，2.6，3，5.2，5，5.4，5，8.9 nm，其中下划线层代表势垒层，斜体代表低 Al 组分层，加粗部分 GaAs 层是吸收区的量子阱，进行了 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ Si 掺杂。

器件吸收区由 W_1 、 W_2 两个量子阱构成，光电跃迁机制明确： W_1 阱基态能级作为光吸收跃迁的初态 E_1 ，对应的电子激发态位于低势垒阱口位置，并与窄阱 W_2 的基态发生能级耦合，形成光响应上能态 E_2 。该耦合子带宽度为 12 meV，其上能态底部与基态 E_1 的能级间距为 78 meV，匹配甚长波红外光跃迁能量需求。弛豫区中设置 W_3 - W_5 三个量子阱，采用双耦合阱抽取提高抽取效率^[13]。通过精准调控耦合量子阱的阱、垒厚度参数，使相邻阱 W_3 与 W_4 中本征能级相互靠近，基态发生能级耦合，形成宽度为 3 meV 的第一级抽取子带 E_3 ，可高效捕获源自上能态 E_2 的光生电子。 E_3 顶部到 E_2 底部能量间隔 36 meV，满足纵光学（longitudinal optical、LO）声子协助隧穿的能量匹配条件，保障光生电子的高效隧穿输运^[1]。同时，抽取态 E_4 与下一周期基态的能级间距仅为 6 meV，光生电子可通过该小能量台阶实现快速弛豫跃迁，顺利传输至下一周期基态，最终形成稳定光电流，完成整个光电响应输运过程^[9]。

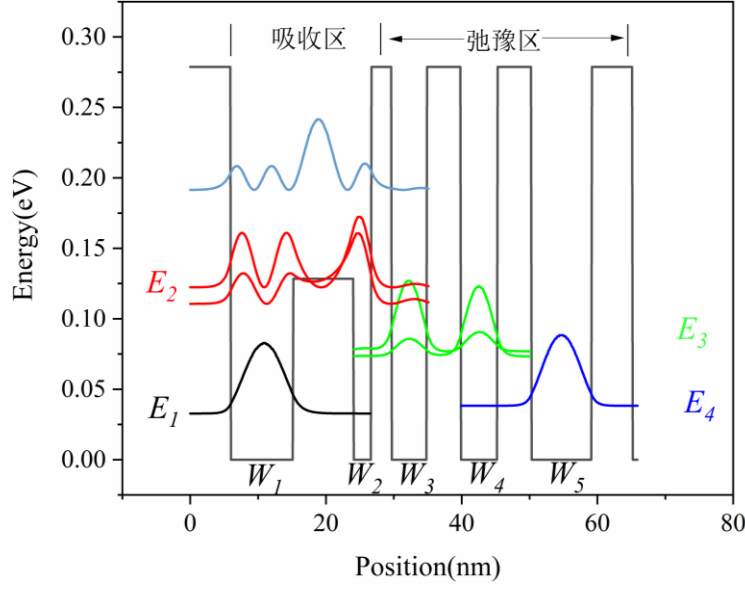


图 1 14 μm 波长变势垒 QCD 导带结构示意图

Figure1 Schematic diagram of a 14 μm QCD conduction band structure with variable barrier.

二维子带间光跃迁的吸收强度通常用于表征基态电子的光子激发跃迁能力，本文采用二维吸收强度 α_{2D} 描述基态能级 E_1 电子向激发态跃迁能力^[14]：

$$\alpha_{2D} = \frac{\omega q^2 n_s}{\epsilon_0 n_r c} \sum_{i,j} |Z_{ij}|^2 \cdot \frac{\Gamma_{ij}}{(E_j - E_i - \hbar\omega)^2 + \Gamma_{ij}^2} \quad (1)$$

式中 ω 是光的角频率， ϵ_0 是真空介电常数， n_s 是掺杂阱中面掺杂浓度， n_r 为材料折射率， c 为真空中光速， q 为元电荷电荷量， Γ 为子带间跃迁的洛伦兹吸收线宽的半高全宽值， Z_{ij} 是能级 E_i 和能级 E_j 之间的跃迁矩阵元，由于文献^[14]中论证了基态能级 E_1 能够向 E_2 能级中所有激发态跃迁，因此此处求和需要将所有基态向所有激发态 E_2 能级跃迁的过程都计算在内。基于能带结构仿真计算结果，本文设计的变势垒结构中 E_1 到 E_2 的跃迁矩阵元为 2.4 nm，吸收强度为 1.55%。

结合上述光电流产生机制可知，QCD 的响应性能并非仅由基态能级 E_1 上

电子向激发态 E_2 跃迁的吸收强度决定，激发态载流子的抽取与输运效率是制约器件响应率的另一核心关键。光生载流子被激发至 E_2 能级后，存在两条竞争型弛豫路径：其一为有效输运路径， E_2 能级载流子通过释放 LO 声子能量隧穿跃迁抽取至 E_3 能级，进而完成跨周期输运并形成光电流；其二为无效损耗路径，载流子通过释放多阶 LO 声子能量直接弛豫回落至基态 E_1 ，造成光生载流子损耗，无法参与光电响应。由此可见，激发态 E_2 载流子向抽取能级的跃迁概率，即载流子抽取效率 (p_e)，直接决定了有效光生载流子的利用率。基于载流子散射竞争机制建立抽取效率计算模型^[15]，抽取效率 (p_e) 计算公式如下：

$$p_e \approx \frac{S_{2,3}}{S_{2,3} + S_{2,1}} \quad (2)$$

其中 S 是散射速率，下标 2,3 代表能级 E_2 上的载流子向抽取区能级跃迁的散射速率，下标 2,1 代表能级 E_2 上的载流子向基态能级跃迁的散射速率。器件弛豫区中 W_3 与 W_4 量子阱存在能级耦合效应，可协同完成 E_2 能级光生载流子的抽取过程，大幅提升有效散射速率占比。经计算，本文所提变势垒结构器件的载流子抽取效率可达 35%。我们同步设计了传统的单阱垂直跃迁结构与之对比，单阱垂直跃迁结构的抽取效率仅有 24%，明显低于本文设计的变势垒耦合阱结构。

综上可知，甚长波 QCD 器件的峰值响应性能由光吸收强度与载流子抽取效率共同耦合决定。结合 QCD 峰值响应率 (R_p) 理论公式可定量分析器件光电响应特性，其表达式为：

$$R_p = \frac{\lambda q}{hc} \eta p_e \frac{1}{N} \cong \frac{\lambda q}{hc} \alpha_{2D} p_e \quad (3)$$

其中 λ 是响应波长， h 是普朗克常数， η 是吸收效率， N 是 QCD 的周期数。基于前文计算得到的吸收强度与抽取效率参数，代入公式可求得本文设计的变势垒甚长波 QCD 理论峰值响应率可达 41.4 mA/W。相较于文献报道的同波长

QCD 器件 4 mA/W 的响应率水平^[10]，该新型结构器件可实现响应率的数量级提升，光电响应增益效果显著。

为验证理论仿真结果，本文采用金属有机化合物气相沉积（Metal Organic Chemical Vapor Deposition、MOCVD）设备生长了 30 周期的甚长波 QCD 器件，随后进行工艺流片，制备了 200 μm $\times$ 200 μm 方台器件。

3 器件表征

采用 FTIR 光谱仪结合黑体，标定变势垒 QCD 器件的响应谱如图 2 所示：

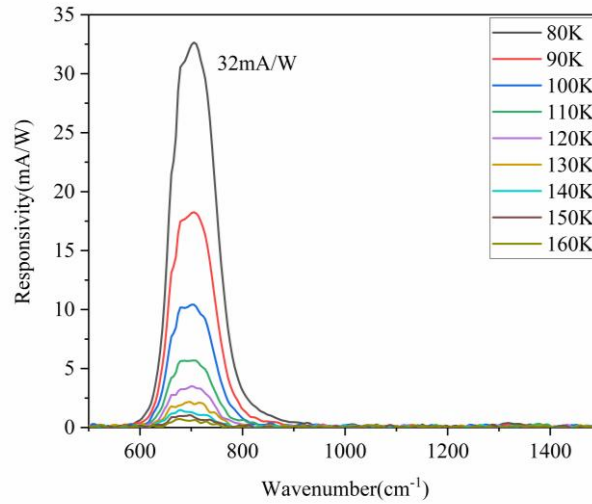


图 2 变势垒器件 0 偏压下响应光谱

Figure.2 Response spectrum of the QCD with variable barriers at 0 bias.

图 2 为变势垒结构甚长波 QCD 器件在零偏压条件下的光谱响应测试结果。

由测试谱图可知，器件峰值响应波数位于 700 cm^{-1} 附近，对应工作波长 14.3 μm ，吸收跃迁能量为 87 meV，对应于基态 E_1 到激发态 E_2 顶部的跃迁。由于 E_2 耦合子带存在固有能带宽度，器件光谱响应存在一定展宽，其相对线宽 $\Delta\lambda/\lambda$ 为 14%，高于传统单阱垂直跃迁 QCD 的响应线宽 $\Delta\lambda/\lambda$ 7%^[1]，与现有双阱耦合结构线宽 11% 较为接近^[13]，符合多阱耦合能级体系的光谱响应特性。此外，响应光谱在

主峰左侧 679cm^{-1} 位置存在一处次级响应峰，对应的特征光子能量为 84 meV ，相较于主峰跃迁能量低 3 meV ，对应于基态 E_1 到 E_2 底部的跃迁。理论上，两级跃迁的能量差值应与 E_2 子带宽度相匹配，而实测能量差值偏小，主要原因是实际外延材料生长过程中存在界面粗糙度、组分波动等非理想因素，致使器件实际洛伦兹展宽效应强于理论仿真结果，缩小了双峰的能量间距。该非理想特性也是导致器件实测性能与理论值存在偏差的核心原因：器件在 80 K 零偏压工作条件下的实测峰值响应率为 32 mA/W ，略低于 41.4 mA/W 的理论计算值。尽管存在一定的性能损耗，但该指标相较于同波段 QCD 器件 4 mA/W 的文献报道值仍实现了显著提升^[10]，充分验证了本文变势垒耦合阱结构对甚长波 QCD 光电响应性能的优化效果。

本文设计的甚长波 QCD 器件性能增益，主要得益于吸收区变势垒结构与抽取区双阱耦合结构的协同优化效应。两种结构的适配搭配，成功将器件工作温度提升至液氮温区，且在该温度下仍可保持 32 mA/W 的稳定响应率，有效突破了传统甚长波 QCD 仅能在液氮温区工作的局限。但器件的高温工作性能仍存在进一步提升的瓶颈，弛豫区外侧 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 势垒与 GaAs 量子阱之间 279 meV 的势垒高度有限，无法有效抑制高温工况下吸收区电子的热激活泄漏行为。该缺陷直观表现为器件响应率随工作温度升高呈现快速衰减趋势，当温度升至 160 K 时，器件峰值响应率仅剩余 2 mA/W ，与热电制冷器 220 K 的极限工作温度存在较大差距，现阶段器件仍需依托液氮制冷杜瓦实现稳定工作，尚未实现完全无液氮制冷的应用条件。

从能带结构特性分析，本文器件吸收区的 E_2 能级位于量子阱阱口位置，该结构特性使器件可通过偏压调控优化载流子抽取效率，进而提升整体光电响应

性能。图 3 为器件峰值响应率随外加偏压的变化特性曲线，本文以与光电流同向的偏压为正向偏压。测试结果表明，施加反向偏压时，器件的峰值响应率随反向偏压增大持续衰减，如图 3 中红色标记点所示；在施加正向偏压时，峰值响应率随着偏压的增大先增加，直到偏压增大到 1.75 V 时，峰值响应率提升到 121 mA/W，此时响应率达到极大值，与同波长双阱器件 1.3 V 偏压下 27 mA/W 的响应率相比^[10]，本文中器件响应率有了明显提升。偏压进一步增大时，响应率迅速降低。

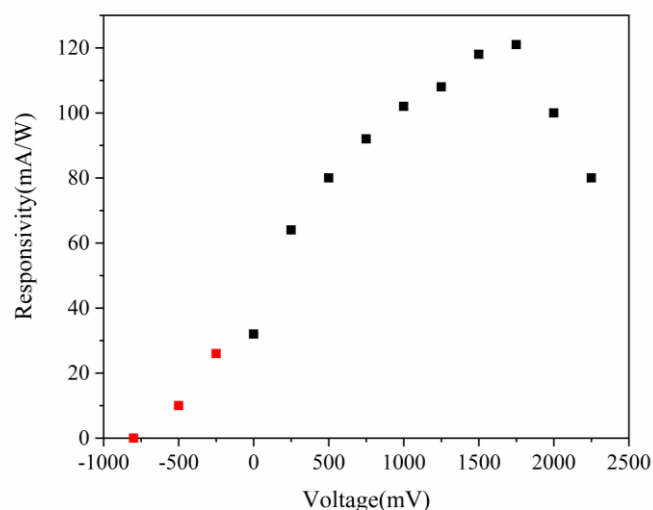


图 3 器件峰值响应率随器件所加偏压变化趋势

Figure 3 Variation trend of QCDs' peak responsivity with the applied bias voltage.

图 4 为变势垒结构甚长波 QCD 器件在不同温度条件下的电流-电压 (I-V) 特性测试曲线。器件暗电流随外加偏压的变化呈现显著的非对称特征，该电学特性本质源于器件有源区独特的非对称能带结构。

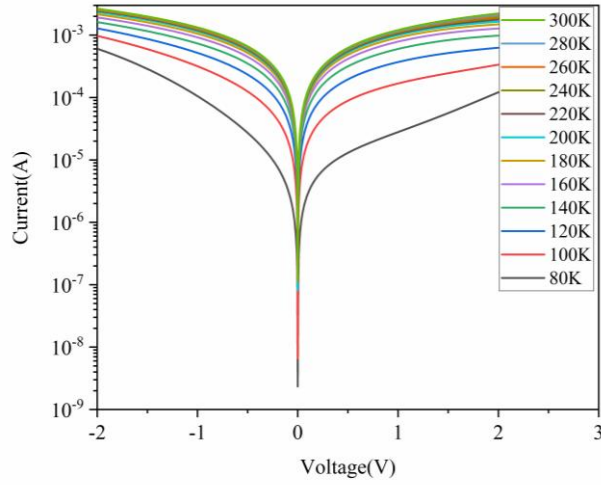


图 4 高势垒器件不同温度下 I-V 特性曲线

Figure 4 I-V characteristic curves of the QCD with variable barriers at different temperatures.

基于不同温度下的器件 I-V 测试曲线，得到器件不同温度下的 R_0 ，用阿伦尼乌斯方程拟合器件的热激活能 E_a （示于图 5）：

$$\ln(R_0 A) = \frac{E_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + B \quad (4)$$

其中 E_a 是器件的热激活能， k_B 是玻尔兹曼常数， B 是常数， A 是器件台面大小， R_0 是器件电阻。拟合结果表明，在 80 K~140 K 低温区间内，器件热激活能为 48 meV，该能量数值与基态到抽取能级 E_3 之间的能量间隔高度吻合，说明该温区内器件的主导热激活通道为基态到抽取能级 E_3 之间能级跃迁，该物理机制与现有理论计算结果一致^[16]中理论计算一致；当工作温度升高至 160 K 以上的高温区间时，器件热激活能降低到 17 meV，该表观能量无法直接对应能带结构中的本征能级差，但其本质并非阿伦尼乌斯拟合模型失效。在高温条件下，基态电子可通过吸收一个 LO 声子的能量（36 meV）后被热激活，总能量为 53 meV，热激活通道仍然是基态到抽取能级 E_3 之间能级跃迁。

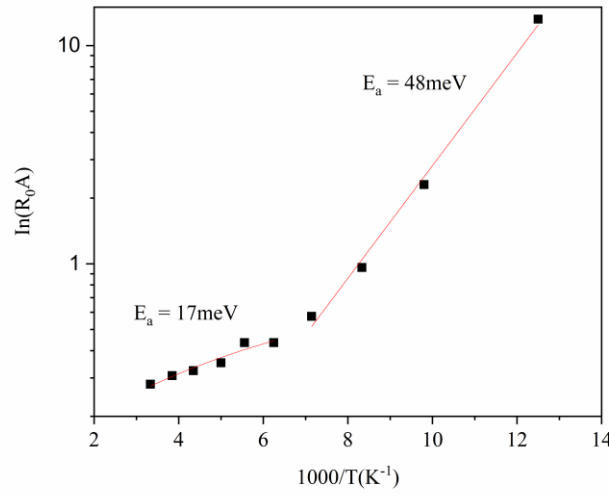


图 5 变势垒器件的 R_0A 随 $1000/T$ 的对数坐标曲线

Figure 5 The logarithmic curve of QCDs R_0A vs $1000/T$.

探测率是表征 QCD 器件信噪比水平与红外探测性能的核心参数，可综合反应器件响应能力、电学损耗及热噪声特性，其数值与器件峰值响应率、零偏电阻及台面尺寸密切相关，计算公式如下^[17]：

$$D_J^* = R_p \sqrt{\frac{R_0 A}{4k_B T}} \quad (5)$$

其中 D_J^* 是器件的热噪声限探测率，其值越高，代表器件的抗热噪声的能力越强，器件的工作温度越高， R_p 是峰值响应率。基于前文测试得到的不同温度下峰值响应率与零偏电阻参数，代入公式可计算获得器件各温度对应的热噪声限探测率，器件探测率随温度的变化规律如图 6 所示。

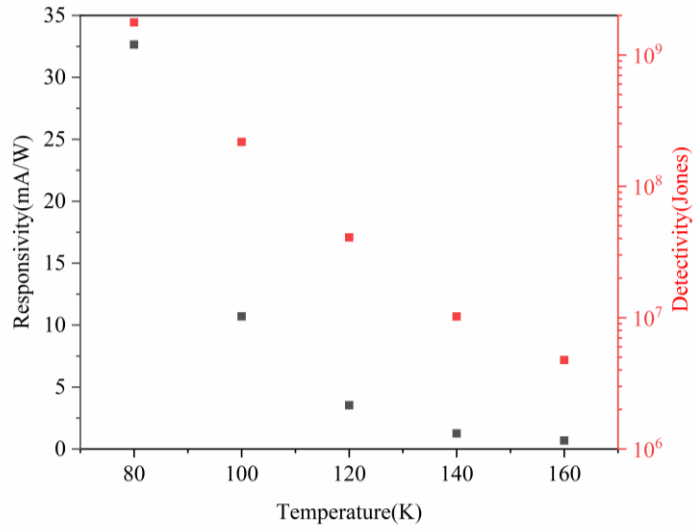


图 6 变势垒器件在零偏压下响应率和探测率随温度变化趋势

Figure6 Variation trend of responsivity and detectivity with temperature at 0 bias.

零偏压、液氮温度工况下，本文变势垒结构 QCD 器件的比探测率可达 $1.7 \times 10^9 \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$ ，现有同波段双阱耦合 QCD 器件在相同测试条件下的探测率仅为 $3 \times 10^7 \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$ [10]，而采用小能量台阶结构的传统甚长波 QCD 器件，在 50 K 低温条件下其探测率已低于 $10^9 \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$ [7]。通过横向对比可知，变势垒结构的引入可显著优化甚长波 QCD 的噪声抑制能力与探测灵敏度，实现了液氮温区下器件探测率的数量级提升，有效突破了传统甚长波 QCD 的探测性能瓶颈。

需要说明的是，热噪声限探测率模型仅适用于零偏压工作工况。当器件施加外部偏压时，暗电流噪声显著增强，热噪声不再占据主导地位，传统热噪声限探测率模型不再适用，需采用适配偏压工况的探测率表征方法。本文借鉴量子阱红外探测器（QWIP）的偏压探测率表征体系，采用文献[2]报道的偏压下 QCD 比探测率计算公式完成性能评估，具体表达式如下：

$$D_{Dark}^* = \frac{R_p}{\sqrt{(\frac{2q|J_{Dark}|}{N})}} \quad (6.1)$$

其中， q 代表电子电量， J_{Dark} 代表暗电流密度， N 代表有源区周期数。结合图 4 的 I-V 测试结果、探测器台面面积以及器件周期数，可得器件在 1.75V 偏压下的液氮温度比探测率为 $2.6 \times 10^9 \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$ 。与零偏压下探测率相比，1.75V 偏压下器件探测率略有提高，主要来源于吸收区低势垒的设计在外加偏压的条件下能有效提高器件响应率，能满足高响应率应用场景需求。

4 结 论

综上所述，本文系统开展了变势垒结构甚长波 QCD 器件的有源区结构设计与光电性能验证工作。器件有源区采用双组分 AlGaAs 变势垒构型，实现性能协同优化：吸收区引入低势垒结构，利用双量子阱能级耦合形成双上能态体系，有效提升子带跃迁矩阵元与光吸收效率，最终器件在 80 K 零偏压条件下实现 32 mA/W 的高峰值响应率。弛豫区采用高势垒结构，有效抑制吸收区光生电子的热激活泄漏与连续态跃迁损耗，显著提升器件电阻，改善器件高温工作特性。测试结果表明，本文器件在液氮温度下实现 $1.7 \times 10^9 \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$ 的高探测率，相较于同波段 QCD 器件性能提升两个数量级，成功突破了传统甚长波 QCD 仅能在液氮温区工作的技术瓶颈，将器件稳定工作温区拓展至液氮温区，且在 160 K 高温条件下仍可保持 2 mA/W 的峰值响应率。此外，器件具备优异的偏压调控性能，在 1.75 V 偏压、液氮温度工况下，峰值响应率可提升至 121 mA/W，对应比探测率可达 $2.6 \times 10^9 \text{ cmW}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$ ，能够充分满足低温环境下高灵敏、高响应红外探测的应用场景需求，为高性能甚长波 QCD 器件的结构设计与性能优化提供了可行的技术方案。

参考文献

- [1] Giorgetta F R., Baumann E, Graf M, Yang QK, Manz C, Kohler K 2009 *IEEE J. Quantum Electron* **45** 1039.
- [2] Gendron L., Koeniguer C, Berger V, Marcadet X 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 121111.
- [3] Reininger P, Schwarz B, Gansch R, Detz H 2015 *Opt. Express*. **23** 6283.
- [4] Reininger P, Schwarz B, Detz H, Farland DM, Zederbauer T, Andrews AM, Schrenk W, Baumgartner O, Kosina H, Strasser G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 091108.
- [5] Buffaz A, Carras M, Doyennette L, Nedelcu A, Berger V 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 172101.
- [6] Giorgetta FR, Baumann E, Graf M, Ajili L, Hoyler N, Giovannini M, Faist J, Hofstetter D, Krötz P, Sonnabend G 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 231111.
- [7] Schwarz B, Reininger P, Detz H, Zederbauer T, Andrews AM, Schrenk W, Strasser G 2013 *Sensors-Basel*. **13** 2196.
- [8] Schwarz B, Reininger P, Ristanić D, Detz H, Andrews AM, Schrenk W, Strasser G 2014 *Nat Commun*. **6** 4085.
- [9] Zhai S, Liu J, Wang X, Zhuo N, Liu F, Wang Z, Liu X, Li N, Lu W 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 191120.
- [10] Guo K, Zhu YX, Li K, Liu JQ, Zhai SQ, Liu SM, Zhuo N, Zhang JC, Wang LJ, Liu FQ, Wang XH, Wei ZP 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 061101.
- [11] Guo K, Chen Y, Zhu YX, Li K, Zhai SQ, Liu FQ, Tang JL, Wang XH, Wei ZP, Liu JQ 2024 *Chin. Opt. Lett.* **22** 083701.

- [12] Titus S, Radu I 2010 *Solid State Commun* **150** 888.
- [13] Li K, Liu SM, Zhuo N, Liu JQ, Zhu YX, Guo K, Zhai SQ, Zhang JC, Wang LJ, Li Y, Liu FQ 2022 *Appl. Phys. Express.* **15** 032005.
- [14] Li K, Ren F, Liu SM, Liu JQ, Zhuo N, Zhu YX, Zhai SQ, Zhang JC, Wang LJ, Li Y, Liu FQ 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 051101.
- [15] Yu LS, Li SS, HO P 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 212712
- [16] Li L, Zhou XH, Lin T, Li N, Zhu ZQ, Liu FQ 2016 *Infrared Phys. Techn.* **78** 72.
- [17] Bigioli A, Armaroli G, Vasanelli A, Gacemi D, Todorov Y, Palaferri D, Li L H, Davies AG, Linfield EH 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 161101.

Variable Barrier Very-Long-Wave infrared Quantum Cascade Detector

Li Kun[†], Ba Sai, Xie Tianle, Zhou Liping, Yang Yu

(The 48th Research Institute of CETC, Changsha 410000, China)

Abstract:

To mitigate the high operational cost caused by the liquid-helium cooling requirement for very-long-wave infrared quantum cascade detectors (VLW-QCDs), we propose and demonstrate a variable-barrier VLW-QCD structure. The active region adopts AlGaAs barriers with two different Al compositions: low-Al-content barriers are employed in the absorption region to increase the light absorption efficiency and achieve an optical absorption intensity of 1.55%, while high-Al-content barriers are introduced in the relaxation region to suppress thermally activated leakage of excited-state electrons and raise the device resistance. A coupled double-quantum-

well structure is further integrated into the extraction region, raising the carrier extraction efficiency to 35%, which outperforms the 24% of traditional single-well devices.

Benefiting from the synergistic structural optimization, the fabricated 14 μm device achieves a peak responsivity of 32 mA/W and a detectivity of $1.7 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ at liquid nitrogen temperature under zero bias, with the detectivity improved by two orders of magnitude compared with reported counterparts. When a forward bias of 1.75 V is applied, the responsivity is further enhanced to 121 mA/W, with the detectivity reaching $2.6 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$. This design successfully upgrades the operating temperature of 14 μm VLW-QCD from liquid-helium to liquid-nitrogen temperature, and the device still maintains a responsivity of 2 mA/W at 160 K.

Keyword: Very-long-wave infrared; Quantum cascade detectors; Variable Barriers; Responsivity

† Li Kun.E-mail:2370232410@qq.com