

文章编号: 1672-8785(2025)06-0010-05

## 中/长波双色 II 类超晶格红外焦平面 器件退火技术研究

李景峰 刘 铭 张金钰 付 伟

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 双色探测器相较于单色探测器具有更高的探测精度, 是第三代红外探测器中的典型代表。II 类超晶格具有宽吸收光谱、高均匀性等突出优点, 可用于制备双色探测器。退火技术则可通过提高侧壁钝化质量以及材料与电极接触质量来改善双色 II 类超晶格器件性能。通过对器件进行一系列不同温度的退火实验, 就退火对中/长波双色 II 类超晶格红外焦平面器件性能的影响进行分析研究。通过优化退火工艺, pnp 结构器件的长波对应阻抗可提高 4.6 倍, npn 结构器件的长波对应阻抗可提高 31%。相比于通过优化材料结构和器件结构来提升器件性能, 退火具有高效、简便等突出优点。该研究对中/长波双色 II 类超晶格红外焦平面器件的性能提升具有一定的参考意义。

**关键词:** II 类超晶格; 退火技术; 红外探测器

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.06.002

## Study on Annealing Technology of Mid-/Long-Wavelength Two-Color Type-II Superlattice Infrared Focal Plane Device

LI Jing-feng, LIU Ming, ZHANG Jin-yu, FU Wei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Compared with the monochromatic detector, the two-color detector has higher detection accuracy and is the typical representative of third-generation infrared detectors. Type-II superlattice has outstanding advantages such as wide absorption spectrum and high uniformity, and can be used to prepare two-color detectors. Annealing technology can improve the performance of two-color type-II superlattice devices by improving the quality of sidewall passivation and the quality of contact between materials and electrodes. By conducting a series of annealing experiments at different temperatures on the device, the effect of annealing on the performance of mid-/long-wavelength two-color type-II superlattice infrared focal plane devices is analyzed and studied. By optimizing the annealing process, the long-wavelength corresponding impedance of the pnp structure device can be increased by 4.6 times, and the long-wavelength corresponding impedance of the npn structure device can be increased by 31%. Compared with improving device performance by optimizing material structure and device structure, annealing has outstanding advantages such as high efficiency and simplicity. This study

**收稿日期:** 2024-11-28

**作者简介:** 李景峰(1990-), 男, 吉林梅河口人, 高级工程师, 博士, 主要从事红外探测器设计及制备工艺研究。

**\*通讯作者:** E-mail: ljf\_0902@163.com

has certain reference significance for the performance improvement of mid-/long-wavelength two-color type-II superlattice infrared focal plane devices.

**Key words:** type-II superlattice; annealing technology; infrared detector

## 0 引言

20 世纪 80 年代末, II 类超晶格开始应用于红外探测器制备。与传统红外探测器制备材料相比,它具有宽吸收光谱、高均匀性等突出优点<sup>[1-4]</sup>,因而被广泛用于制备红外探测器。相关研究表明,双色探测器相较于单色探测器具有更高的探测精度,可降低虚警率<sup>[5]</sup>。将 II 类超晶格应用于双色探测领域可发挥其性能优势,进而制备出高性能双色红外焦平面探测器。目前报道的最新研究工作中已完成像元间距为 12  $\mu\text{m}$ 、阵列规模为 1280 $\times$ 720 的中/长波双色 II 类超晶格红外焦平面探测器制备<sup>[6]</sup>。

为实现像元的有效隔离并提高探测器信噪比,II 类超晶格探测器需要在焦平面阵列中形成台面结<sup>[7-8]</sup>。与单色器件相比,双色器件的刻蚀深度需要进一步加深,因此对刻蚀质量及钝化<sup>[9]</sup>、电极制备质量提出了更高要求。这就加大了器件制备难度,可以通过退火技术来优化材料与钝化层以及材料与电极之间的接触,从而优化器件性能。

本文就退火对 pnp 与 npn 两种结构的中/长波双色 II 类超晶格红外焦平面器件电学性能的影响进行研究。通过分析不同温度退火下器件电学性能的变化情况,优化出相关退火工艺。结果表明,pnp 结构器件的长波对应阻抗可提高 4.6 倍,npn 结构器件的长波对应阻抗

可提高 31%,实现了器件性能的提升。

## 1 实验方案

分别选用在衬底上生长的 pnp、nnp 两种结构的双色 II 类超晶格材料来制备器件,从而分析退火对不同结构器件的影响。首先采用干法刻蚀工艺制备相应深度的台面结构,然后进行钝化层生长,制备电极接触孔,生长电极,最终完成器件结构制备。不同结构器件的像元间距、阵列规模和制备方式保持一致。通过半导体分析仪对制备器件的电学性能进行测试,主要进行  $I-V$  及阻抗随电压的变化测试,确保器件本身的电学性能正常。然后将器件放入退火装置,在  $\text{H}_2$ 、Ar 环境中采用不同温度进行退火。退火过程中保证器件状态稳定,同时控制每次退火的时间并使其保持一致。

图 1 为两种不同类型的双色 II 类超晶格器件在电路中的结构以及器件物理结构的示意图。它们采用 pnp 与 npn 两种背靠背结构即方向相反的二极管结构。通过在不同的层中设置相应的吸收层来实现对不同波段红外光的响应。在台面结构里,长波响应区域在上部分,中波响应区域在下部分,可实现中/长波双色红外探测。

## 2 实验结果

对制备的 pnp 结构双色 II 类超晶格器件进

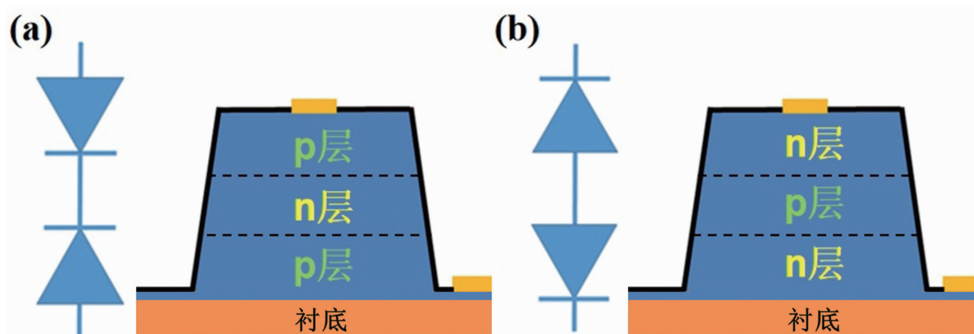


图 1 双色 II 类超晶格器件在电路中的结构以及器件物理结构的示意图: (a) pnp 结构; (b) npn 结构

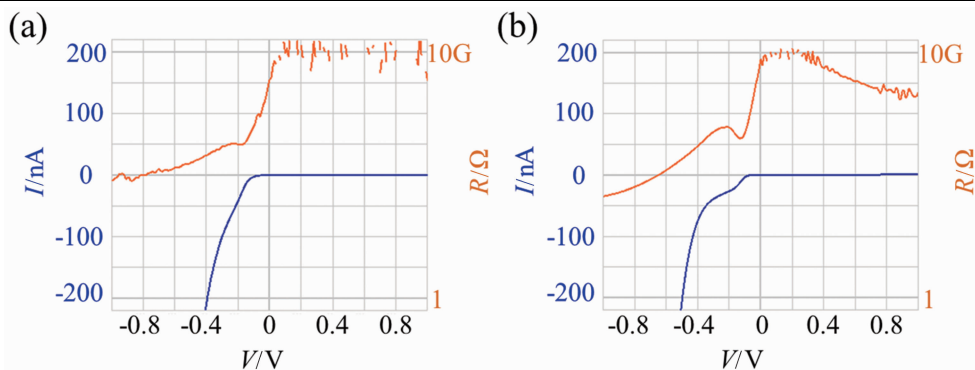


图2 pnp 结构双色 II 类超晶格器件的  $I-V$  及阻抗随电压变化测试的曲线图：(a)退火前；(b)退火后

进行一定温度的退火。分别在退火前后对器件进行  $I-V$  及阻抗随电压变化的测试。图 2(a)为退火前器件  $I-V$  及阻抗随电压变化测试的曲线图，图 2(b)为退火后器件  $I-V$  及阻抗随电压变化测试的曲线图。

通过对比退火前后的  $I-V$  曲线及阻抗随电压的变化曲线可知，退火后阻抗随电压变化曲线中的长波对应阻抗明显提高，增幅可达 4.6 倍，从 1.6 M $\Omega$  提高到 9 M $\Omega$ ；退火后  $I-V$  曲线长波对应一侧中出现明显的平坦区，阻抗随电压变化曲线中的中波对应阻抗略有降低， $I-V$  曲线中波对应平坦区电流增大一倍左右，同时中波对应平坦区变小。下面对该现象的原因进行分析。

长波响应区域生长的钝化层处在台面侧壁位置。侧壁由于存在倾角，其平滑程度相较于底部有一定程度的下降，导致侧壁钝化覆盖质量相较于底部也会有一定程度的下降。退火会使钝化层与台面侧壁具有更为紧密的接触，从而提高长波响应区域的钝化覆盖质量。相比于退火激发表面态引起的性能劣化<sup>[10]</sup>，此时钝化质量的提升占主导地位，使整体长波探测性能提高。

与长波响应区域相比，中波响应区域的钝化质量受退火影响较小，而且由于深台面结构为正梯形结构，位于下方的中波探测区域具有更高的占空比，因此退火激发表面态在中波探测区域具有更大的影响，导致中波对应阻抗略有降低，电流有一定程度的增大。但对于双色

探测性能的优化，大幅提高长波性能而略微降低中波性能是可以容忍的。

同时退火会降低材料与电极之间的肖特基势垒，从而弱化肖特基势垒对器件性能的影响，提高材料与电极之间的接触质量，减小接触电阻，提升器件性能。

控制单一变量，提高对制备的 pnp 结构双色 II 类超晶格器件的退火温度后，对其进行退火。退火后对器件进行  $I-V$  及阻抗随电压变化的测试(结果见图 3)。从图 3 中可以看出，长波对应阻抗没有进一步提高(而是同中波对应阻抗一起降低)，从 9 M $\Omega$  降到 6 M $\Omega$ ；退火后  $I-V$  曲线长波对应一侧的平坦区明显变小，并且  $I-V$  曲线中波对应电流进一步增大，中波对应一侧的平坦区也开始变小。这说明随着退火温度的升高，通过退火提高器件长波性能达到一定程度以后，钝化质量提升已经达到极限而没有继续提升的空间。此时表面态起到了主导

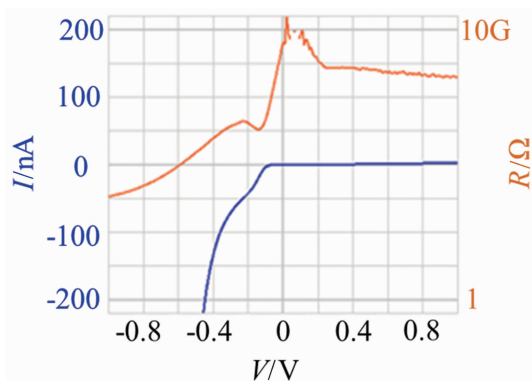


图3 退火温度进一步提升后 pnp 结构双色 II 类超晶格器件的  $I-V$  及阻抗随电压变化测试的曲线图

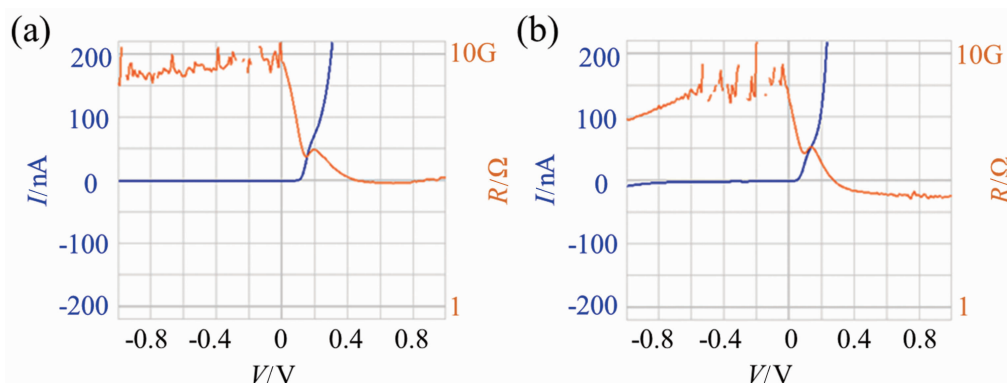


图 4 npn 结构双色 II 类超晶格器件的  $I-V$  及阻抗随电压变化测试的曲线图:(a)退火前;(b)退火后

作用,在特定温度下导致器件性能劣化,这也验证了只有在一定温度下退火器件性能才会得到提升。

上述结果表明,通过将退火工艺应用于 pnp 结构双色 II 类超晶格器件,可有效提高双色探测器件的中长波探测性能。采用相同的退火工艺,对 npn 结构双色 II 类超晶格器件进行退火,并对结果进行分析,验证该工艺是否适用于 npn 结构双色 II 类超晶格器件。

图 4(a)为 npn 结构双色 II 类超晶格器件在退火前进行  $I-V$  及阻抗随电压变化测试的曲线图,图 4(b)为 npn 结构双色 II 类超晶格器件在退火后进行  $I-V$  及阻抗随电压变化测试的曲线图。

通过对比退火前后的  $I-V$  曲线及阻抗随电压的变化曲线可知,阻抗随电压变化曲线中的长波对应阻抗从退火前的  $1.6\text{ M}\Omega$  提高到退火后的  $2.1\text{ M}\Omega$ , $I-V$  曲线中的长波对应区域没有出现明显的平坦区,中波对应电流增大一倍左右,中波对应的平坦区略微变小。这说明 npn 结构器件和 pnp 结构器件的退火效果并不相同,其长波对应阻抗提高 31% 左右,增幅较小。

npn 结构器件性能提升的机理与 pnp 结构器件相同,但性能提升的幅度又存在差异。这与退火对器件性能的影响有关:一方面退火会影响钝化接触效果,另一方面退火会影响器件表面态,并且 npn 结构 II 类超晶格和 pnp 结构 II 类超晶格作为不同类型材料与电极金属之间

的势垒也不同,npn 结构 II 类超晶格材料与 pnp 结构 II 类超晶格材料的表面态也存在差异,这会导致不同类型材料退火效果的不同。

### 3 结束语

通过分析 pnp 及 npn 结构双色 II 类超晶格器件退火前后的  $I-V$  及阻抗随电压变化曲线可知,退火可以在不明显牺牲中波性能的前提下,提升长波性能,特别是 pnp 结构器件退火后可将长波对应阻抗提高 4.6 倍,npn 结构器件可将长波对应阻抗提高 31%,从而改善双色 II 类超晶格器件的整体性能。相比于通过优化材料结构和器件结构来提升器件性能,退火具有高效、简便等突出优点,为其他双色器件性能优化提供了一种思路。后续将系统地开展其他气氛下的退火试验,更为深入地分析退火过程中的机理,从而进一步优化器件性能。

### 参考文献

- [1] 张艳华,马文全,卫焯,等.长波和甚长波及其双色 InAs/GaSb 二类超晶格红外探测器的研究进展 [J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014, 44(4): 390-395.
- [2] 白治中,徐志成,周易,等.  $320\times 256$  元 InAs/GaSb II 类超晶格中波红外双色焦平面探测器 [J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(6): 716-720.
- [3] 张宏飞,朱旭波,李墨,等. 铟化物中/中波双色红外探测器研究进展 [J]. 红外技术, 2022, 44(9): 904-911.
- [4] 张舟,汪良衡,杨煜,等. InAs/GaSb 二类超晶

- 格中长波双色红外焦平面器件研究 [J]. *红外技术*, 2018, **40**(9): 863–867.
- [5] Reibel Y, Chabuel F, Vaz C, et al. Infrared Dual Band detectors for next generation [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 801238.
- [6] Delaunay P Y, Noshov B Z, Gurga A R, et al. Advances in III-V Based Dual-Band MWIR/LWIR FPAs at HRL [C]. *SPIE*, 2017, **10177**: 101770T.
- [7] 王海澎, 木迎春, 彭秋思, 等. InAs/GaSb II 类超晶格长波焦平面阵列台面 ICP 刻蚀技术研究 [J]. *红外技术*, 2022, **44**(10): 1027–1032.
- [8] 许佳佳, 黄敏, 徐庆庆, 等. InAs/GaSb II 类超晶格台面的 ICP 刻蚀研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2019, **38**(2): 171–174.
- [9] 张利学, 鲁星, 朱旭波, 等. InAs/GaSb 超晶格中短波双色探测器新型钝化方法研究 [J]. *航空兵器*, 2021, **28**(5): 110–113.
- [10] 崔玉容, 徐志成, 黄敏, 等. InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器光敏元蚀刻表面特性 [J]. *红外与毫米波学报*, 2021, **40**(4): 427–431.