

# 长波量子阱红外探测器的不同光栅耦合机制研究

杜巍<sup>1</sup>, 王继强<sup>2\*</sup>, 刘小林<sup>2</sup>, 许金通<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学理学院, 上海

<sup>2</sup>中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料与探测器重点实验室, 上海

收稿日期: 2023年3月18日; 录用日期: 2023年4月13日; 发布日期: 2023年4月20日

## 摘要

量子阱红外光电探测器(QWIP)中的材料由各向异性材料组成, QWIP中的光吸收对应于QWIP子带之间的跳跃。由于n型QWIP材料(如GaAs)中导带 $\Gamma$ 能谷电子的有效质量是各向同性的, 因此器件无法吸收垂直于表面的入射光。为了吸收入射光, 需要设计特殊的衍射耦合结构。为了比较不同衍射耦合对光响应的影响, 在 $320 \times 256$ 规模QWIP焦平面阵列上设计了 $160 \times 256$ 个凹光栅和 $160 \times 256$ 个凸光栅的新结构。采用有限差分域(FDTD)算法对两个光栅进行仿真, 并计算出两个光栅的光响应。得到了不同偏置下QWIP凹面光栅耦合的焦平面阵列和凸光栅耦合的焦平面阵列的噪声、NETD和平均响应度等性能参数。结论是凸光栅焦平面阵列的响应大于相同背景水平下凹光栅焦平面阵列的响应。凸光栅焦平面阵列的平均响应度为 $20.99 \text{ mV/K}$ , 凹光栅焦平面阵列的平均响应度为 $10.1 \text{ mV/K}$ 。凹光栅焦平面阵列的非盲元率为99.4%, 凸光栅焦平面阵列的非盲元率为99.5%。

## 关键词

QWIP, 衍射耦合, FDTD

# The Study of Different Grating Coupling Based on Long Wavelength Quantum Well Infrared Photodetector Focal Plane

Wei Du<sup>1</sup>, Jiqiang Wang<sup>2\*</sup>, Xiaolin Liu<sup>2</sup>, Jintong Xu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

\*通讯作者。

文章引用: 杜巍, 王继强, 刘小林, 许金通. 长波量子阱红外探测器的不同光栅耦合机制研究[J]. 应用物理, 2023, 13(4): 111-117. DOI: 10.12677/app.2023.134013

## Abstract

The materials in a quantum well infrared photodetector (QWIP) are composed of heterogeneous materials and the light absorption in a QWIP corresponds to a jump between the sub-bands of the QWIP. Since the effective mass of the conduction band  $\Gamma$ -energy valley electrons in n-type QWIP materials such as GaAs is isotropic, the devices are unable to absorb incident light perpendicular to the surface. In order to absorb the incident light, special diffraction coupling structures need to be designed. In this paper, in order to compare the effect of different diffraction coupling on the light response, a new structure consisting of  $160 \times 256$  concave gratings and  $160 \times 256$  convex gratings has been designed on a  $320 \times 256$  scale QWIP focal plane array. The two gratings are simulated by finite difference time domain (FDTD) algorithm, and the light response of the two gratings is calculated. The performance parameters such as noise, NETD and average responsivity of QWIP coupled with concave gratings and convex gratings at different bias are obtained. The conclusion is that the response of the convex gratings focal plane array is greater than the response of the concave gratings focal plane array for the same background level. The average responsivity of the convex gratings focal plane array is 14.2 mV/K, and the average responsivity of the concave gratings focal plane array is 10.1 mV/K. The operable pixel factor of the concave gratings focal plane array is 99.3%, the operable pixel factor of the convex gratings focal plane array is 99.5%.

## Keywords

QWIP, Diffraction Coupling, FDTD

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在过去的二十年中[1], 由于晶体生长、光刻和半导体蚀刻技术的进步, 量子阱红外探测器(QWIP)技术取得了重大进展[2], 从而产生了大幅面焦平面阵列。这种量子阱红外探测器可以应用于红外遥感、医疗技术、红外侦查等领域, 以取代传统的红外探测器[3]。传统的碲镉汞红外探测器材料制备比较困难以及大面积均匀性比较差[4], 使其发展达到瓶颈, 量子阱红外探测器其使用的 III-V 族材料均匀性好、工艺简单等具有许多优势, 也成为研究人员研究的热点。根据量子阱子带间跃迁的选择规则, 必须增加光耦合结构, 以便吸收正常入射的光[5]。二维介质光栅是量子阱红外探测器中常见的光耦合结构之一[6]。但是, 在工艺制备过程中容易出现各种误差, 因此无法比较不同形状的光栅耦合性能。为了比较不同形状的光栅耦合性能, 设计了  $320 \times 256$  规模的量子阱焦平面探测器, 其中一半为凸光栅耦合, 一半为凹光栅耦合, 并对制备的器件进行了测试。

## 2. 材料参数设计

利用分子束外延的方法在半绝缘的 GaAs 衬底的晶向(100)上生长量子阱材料[7], 先生长一层厚度为  $300 \mu\text{m}$  的  $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$  作为腐蚀阻挡层, 在生长一层 Si 掺杂浓度为  $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  厚度为  $1.2 \mu\text{m}$  的 GaAs

底部接触层,在底部接触层上生长 20 个周期的 45 nm  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$  势垒和 20 个周期的 6 nm 掺杂浓度为  $0.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的 GaAs 势阱层组成量子阱,最后生长一层掺杂浓度  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  厚度为 1.3  $\mu\text{m}$  的 GaAs 顶部接触层,器件结构如表 1 所示:

**Table 1.** Device material characterization

**表 1.** 器件材料表征

Layer	Thickness/nm	Material	Description	Doping
6	1300	n-GaAs	top connect layer	$1 \times 10^{18}$
5	45	$\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$	Barrier	Undoped
4	6	n-GaAs	20 period	$0.7 \times 10^{18}$
3	45	$\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$	20 period	Undoped
2	1200	n-GaAs	Bottom connect layer	$1 \times 10^{18}$
1	300	$\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$	Etch stop layer	$1 \times 10^{18}$
0	500 $\mu\text{m}$	GaAs	Substrate	Undoped

### 3. FDTD 仿真

FDTD 算法主要是将麦克斯韦方程的旋度微分方程转换为一阶方程的形式[8]。它的麦克斯韦方程的核心表达式为:

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}\end{aligned}\quad (1)$$

在仿真中把量子阱层的生长方向设置为  $z$  轴[9],器件平面设置为  $x$ - $y$  面,  $x$ - $y$  面的中心为  $x=0$ ,  $y=0$  并且把  $n$  型底部接触层的底部设置为  $z=0$  [10],光从衬底方向垂直入射,则量子阱的耦合效率表达式为[11]:

$$\eta(z) = \frac{\iiint E_z^2(x, y, z) dx dy}{\iiint E_{in}^2(x, y, z) dx dy}\quad (2)$$

其中  $E_z$  为  $x$ - $y$  平面上  $Z$  点处的  $Z$  向电分量,  $E_{in}$  为入射光的电场。计算过程中,上层接触层和下层接触层均采用 GaAs 材料[12]。多量子阱区被视为各向异性材料。其介电常数被描述为  $\varepsilon_{QW} = \text{diag}(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ ,  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_{\text{GaAs}}$ ,  $\varepsilon_z = \varepsilon_{\text{GaAs}} + \varepsilon_z^* i$ 。

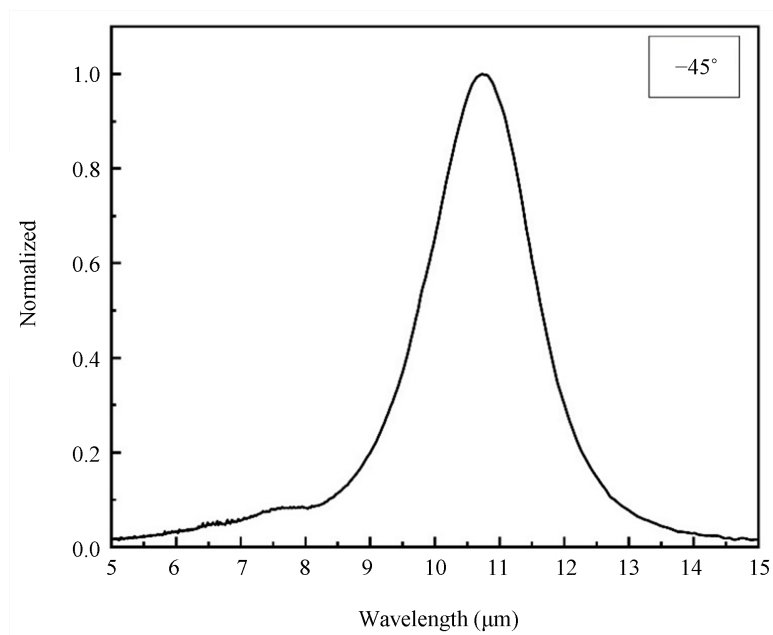
$\varepsilon_z^*$  的具体测试方法为首先测得  $45^\circ$  单元器件的光电流谱,可以得到量子阱材料的吸收系数如图 1 所示。 $\varepsilon_z^*$  和  $\alpha(\lambda)$  之间的关系是

$$\varepsilon_z^* = \alpha(\lambda) \times n_{\text{GaAs}} \times \frac{\lambda}{2\pi}\quad (3)$$

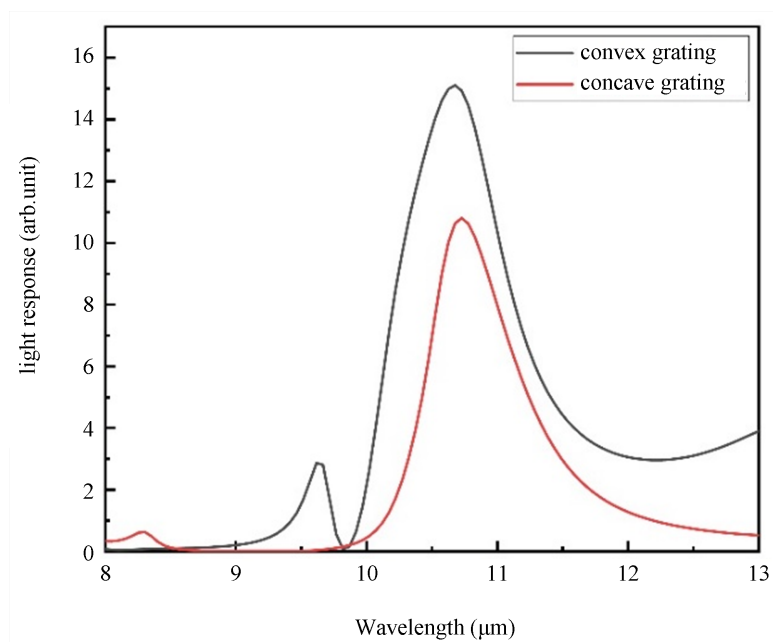
$n_{\text{GaAs}}$  代表 GaAs 的折射率,  $\lambda$  表示入射光的波长。

由于计算机计算能力有限,在模拟中只计算了一个光栅,光栅周期为 3.5  $\mu\text{m}$ ,在  $x$  和  $y$  方向设置周期性边界条件[13],在  $z$  轴上设置 PML 边界条件[14]。仿真结果如图 2 所示。

横坐标表示波长,纵坐标表示量子阱有源区对  $E_z$  分量的吸收。从图中可以看出,当波长为 10.6  $\mu\text{m}$  时,凸光栅耦合结构和凸光栅耦合结构对  $E_z$  的吸收最大,同样可以看出凸光栅和凹光栅的光响应是不同的。



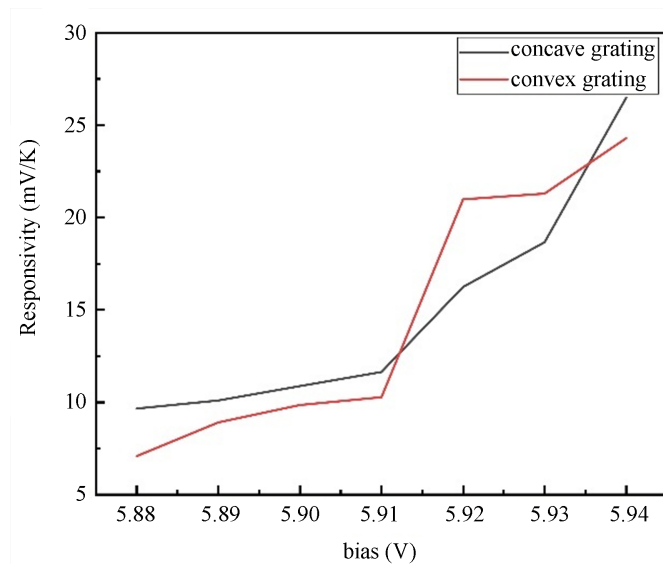
**Figure 1.** Quantum well absorption coefficient as a function of wavelength  
**图 1.** 量子阱吸收系数与波长的关系



**Figure 2.** Light response of concave gratings and convex gratings as a function of wavelength  
**图 2.** 凹光栅与凸光栅的光响应与波长的关系

#### 4. 结果与分析

通过制冷机对量子阱红外探测器制冷改变不同偏压对量子阱焦平面阵列进行测试，将 QWIP 器件的工作偏压从 5.88 V 提高到 5.94 V。由于 QWIP 是一种光导器件，它对偏置电压的依赖性很强。两种耦合结构的量子阱焦平面器件在 45 K 温度下的响应度与偏置关系如图 3 所示。

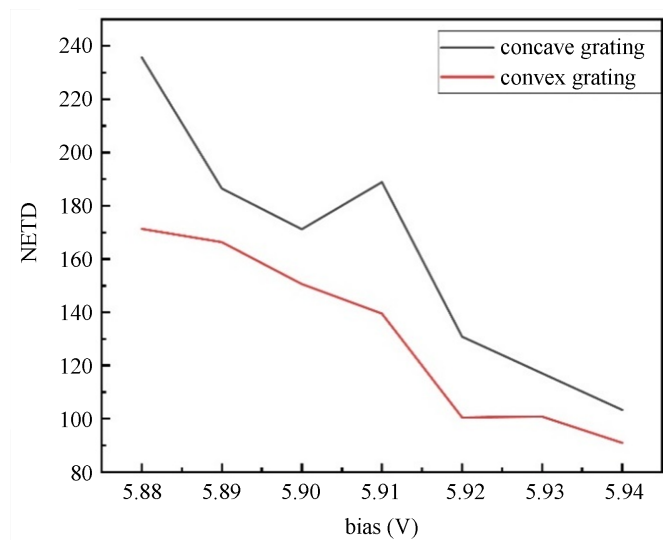


**Figure 3.** The relationship between bias and responsivity

**图 3.** 响应度与偏压的关系

从图中可以看出，两种光栅结构的响应度随着偏置的增大而增大。由于量子阱器件中载流子的浓度会随着偏压的增加而增大，单位时间内激发电子空穴的数量也会随着偏压的增加而增加，从而导致响应增加。

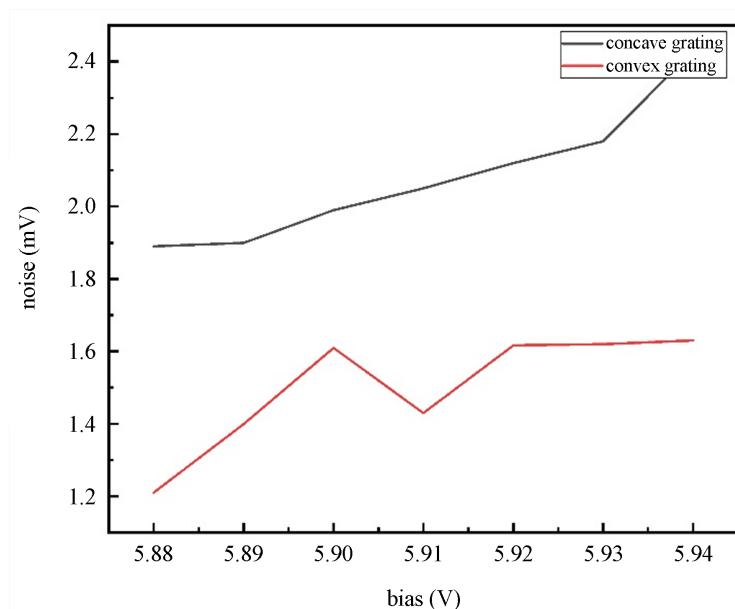
同样，改变偏置电压，观察偏压与 NETD 的关系，如图 4 所示。可以看出，NETD 随着偏置电压的增加而减小，凹光栅耦合的焦平面阵列的 NETD 明显大于凸光栅耦合的焦平面阵列的 NETD。NETD 随偏置增大而减小的原因可以从三个方面解释：一方面，当偏置增大时，量子阱的响应度增大，可以检测到更小的信号；另一方面，随着偏置的增加，量子阱内部载流子的浓度增加，这将降低器件内部的热噪声，从而提高器件的信噪比。第三方面是偏压增大可以增加探测器的灵敏度，可以更好的探测细微的温度变化，从而减小 NETD。



**Figure 4.** The relationship between bias and NETD

**图 4.** 偏压与 NETD 的关系

测试噪声和偏压之间的关系。当偏置电压增大时，器件噪声也相应增大，如图 5 所示。由于偏置电压的增加导致器件内部载流子跃迁的增加，暗电流也会增加，从而提高噪声水平。另一方面由于载流子会与声子相互作用，导致能量的散射，这个过程是随机的，导致载流子的热运动也是随机的，偏压增大，导致热噪声也会增大。



**Figure 5.** The relationship between bias and noise  
**图 5.** 偏压与噪声的关系

为了比较不同耦合结构的性能，比较了两种耦合结构在同一背景水平下的响应度。当温度处于 293 K 和 308 K 处凹光栅耦合焦平面阵列和凸光栅耦合焦平面阵列的响应度。在相同背景下，凸光栅的响应度为 20.99 mV/K，凹光栅的响应度为 10.1 mV/K。可以得出凸光栅的响应度比凹光栅的响应度大，仿真结果与实验结果都表明凸光栅耦合的响应大于凹光栅耦合的响应。此外通过测试测得凹光栅阵列的非盲元率为 99.4%，凸光栅的非盲元率为 99.5%。

## 5. 结论

利用 FDTD 计算了两种光栅的光响应，仿真结果表明凹光栅的光响应小于凸光栅的光响应。并在测试中比较了不同光栅耦合的响应度、噪声以及 NETD。测试结果表明凸光栅耦合的响应度比凹光栅耦合的响应度大。以此证明凸光栅耦合的性能优于凹光栅耦合的性能。

## 参考文献

- [1] Fu, Y., Willander, M., Lu, W. and Xu, W. (1998) Optical Coupling in Quantum Well Infrared Photodetector by Diffraction Grating. *Journal of Applied Physics*, **84**, 5750-5755. <https://doi.org/10.1063/1.368840>
- [2] 郝明瑞. 量子阱红外探测器优化与性能极限研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [3] Wang, R., Yang, Y.L., Wang, G.D. and Liu, Y.Y. (2012) Optimization of Trapezoid Coupling Grating for Long-Wave Quantum Well Infrared Photodetector. *Advanced Materials*, **571**, 252-255. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.571.252>
- [4] 胡小英. GaAs/AlGaAs 量子阱材料微观结构与器件特性分析研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

- 
- [5] Kim, H., Ahn, S.-Y. and Wasilewski, Z. (2019) Fabrication of Grating Coupled GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared Photodetector on an Si Substrate. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **37**, 031209. <https://doi.org/10.1116/1.5088967>
- [6] Chang, H., Zhang, C., Zhao, F. and Hu, X. (2015) Antireflection Coatings on Au Plasmonic Gratings for Infrared Photodetection. *Plasmonics*, **10**, 1519-1524. <https://doi.org/10.1007/s11468-015-9961-y>
- [7] 李向阳, 李宁. GaAs/AlGaAs 量子阱长波 10.55  $\mu\text{m}$  红外焦平面探测器[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1): 1-6.
- [8] Choi, K.K., Allen, S.C., Sun, J.G., Endres, D., Olver, K.A. and Fu, R.X. (2018) Small Pitch Resonator-QWIP Detectors and Arrays. *Infrared Physics and Technology*, **94**, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.09.006>
- [9] Sarusi, G., Levine, B.F., Pearton, S.J., Bandara, K.M.S., Leibenguth, R.E. and Andersson, J.Y. (1994) Optimization of Two Dimensional Gratings for Very Long Wavelength Quantum Well Infrared Photodetectors. *Journal of Applied Physics*, **76**, 4989-4994. <https://doi.org/10.1063/1.357209>
- [10] Chen, H., Chen, X., Zeng, Y., Li, Z., Xiong, D. and Lu, W. (2007) The Distribution of Grating-Coupled Field of Quantum Well Infrared Photodetector Using FDTD Method. *Infrared Materials, Devices, and Applications*, **6835**, 68351E. <https://doi.org/10.1117/12.755093>
- [11] Dupont, E. (2000) Optimization of Lamellar Gratings for Quantum-Well Infrared Photodetectors. *Journal of Applied Physics*, **88**, 2687-2692. <https://doi.org/10.1063/1.1288009>
- [12] Schneider, H., Fleissner, J., Rehm, R., Walther, M., Pletschen, W., Koidl, P., Weimann, G., Ziegler, J., Breiter, R. and Cabanski, W.A. (2003) High-Resolution QWIP FPAs for the 8 - 12  $\mu\text{m}$  and 3 - 5  $\mu\text{m}$  Regimes. *Infrared Technology and Applications*, **4820**, 297. <https://doi.org/10.1117/12.451319>
- [13] 尹伊哲. 金属\介质微腔量子阱红外探测器(QWIP)的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2021.
- [14] Ivanov, R., Smuk, S., Hellström, S., Evans, D., Höglund, L. and Costard, E. (2018) LWIR QWIPs at IRnova for Next Generation Polarimetric Imaging. *Infrared Physics and Technology*, **95**, 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.10.017>