

# 量子阱长波红外探测器混周期光栅对响应带宽的影响

田亚萍<sup>1,2</sup>, 李志锋<sup>2</sup>, 李 宁<sup>2</sup>, 李向阳<sup>2</sup>, 许金通<sup>2\*</sup>

(1. 上海理工大学 理学院, 上海 200093;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 响应带宽的拓展是量子阱红外探测器发展的一个重要方向。本文采用峰值响应波长为 10.55  $\mu\text{m}$  的量子阱材料, 优化了 30  $\mu\text{m}$  中心距的量子阱红外探测器的衍射光栅结构, 在同一光敏元内混合了周期分别为 2.80  $\mu\text{m}$ 、3.50  $\mu\text{m}$  和 4.25  $\mu\text{m}$  的三种光栅结构, 得到了六种不同组合的混周期光栅。响应光谱测试表明, 相比于单一周期光栅, 混周期光栅的响应带宽最多可从 1.20  $\mu\text{m}$  拓展到 1.91  $\mu\text{m}$ , 展宽了 60%, 而黑体响应率仅下降了 12%。

**关键词:** 量子阱红外探测器; 衍射光栅; 光谱响应

中图分类号: TN215

文献标识码: A

## Effect of mixed-period gratings on the photoresponse bandwidth of long-wavelength quantum well infrared photodetectors

TIAN Ya-Ping<sup>1,2</sup>, LI Zhi-Feng<sup>2</sup>, LI Ning<sup>2</sup>, LI Xiang-Yang<sup>2</sup>, XU Jin-Tong<sup>2\*</sup>

(1. College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The expansion of response bandwidth is an important direction in the development of quantum well infrared photodetectors. Using quantum well material with the peak response wavelength at 10.55  $\mu\text{m}$ , the diffraction grating structure in the 30  $\mu\text{m}$  center distance quantum well infrared detector is optimized, and six different combinations of the mixed-period gratings are obtained by mixing three grating structures with the periods of 2.80  $\mu\text{m}$ , 3.50  $\mu\text{m}$ , and 4.25  $\mu\text{m}$  within a single photosensitive pixel. Photoresponse spectroscopy tests show that the response bandwidth of the mixed-period grating can be broadened from 1.20  $\mu\text{m}$  to 1.91  $\mu\text{m}$  by up to 60% compared to a single-period grating, while the blackbody responsivity decreases by only 12%.

**Key words:** quantum well infrared photodetectors, diffraction grating, photoresponse spectrum

## 引言

量子阱红外探测器 (Quantum Well Infrared Photodetectors, QWIPs) 经历了 30 多年的发展, 已经成为第三代红外探测器中重要的分支之一<sup>[1-4]</sup>。GaAs/AlGaAs 基量子阱材料的生长技术成熟、均匀性高以及成本低, 被认为是一种有前途的红外光电探测材

料<sup>[5-7]</sup>。由于量子力学选择规则的限制, 量子阱红外探测器不能直接吸收垂直入射的光, 从而显著降低了吸收效率。对于焦平面成像而言, 需要在芯片光敏元表面引入光栅结构, 以实现垂直入射光的有效耦合<sup>[8-10]</sup>。随着技术的发展, 二维光栅结构得到了广泛应用<sup>[11]</sup>。但是子带跃迁的探测器响应带宽通常比较窄, 目前报道的峰值波长为 10  $\mu\text{m}$  的焦平

收稿日期: 2025-01-21, 录用日期: 2025-03-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2024YFB3211704)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2024YFB3211704)

作者简介 (Biography): 田亚萍 (1998—), 女, 河南省周口人, 硕士研究生, 主要研究领域为量子阱红外探测器响应机制。E-mail: t17856859561@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xujintong@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2025-01-21, accepted date: 2025-03-24



单元,形成第一种台面光栅,如图3(a)所示,标记为SMW结构,此为1号样品。以 $3\times 3$ 个S光栅单元为中心,在其四周排布12个M光栅单元,最外侧排布20个W光栅单元,形成第二种台面光栅,如图3(b)所示,标记为SWM结构。为了补足台面上的空白,在M光栅的顶角间隙处又插入了4个S光栅,此为2号样品。以此类推,3~6号样品分别为MSW、MWS、WSM和WMS结构,如图3(c~f)所示。

芯片制备过程中同时也保留了像元台面均为M光栅的单一周期光栅(Single Periodic Grating, SPM),以便进行对比,将其编为7号样品。样品编号和排布方式列在表1中。

表1 样品1~7的光栅布局

Table 1 Grating layout for Samples 1-7

样品编号 No.	1	2	3	4	5	6	7
光栅排布 设计方式	SMW	SWM	MSW	MWS	WSM	WMS	SPM

图4(a)和4(b)是WSM像元光栅完成流片后SEM照片的俯视图和剖面图。可以看到,所获得的光栅图形边缘清晰,侧面刻蚀陡峭,反映出较为成熟的工艺制程。图4(c)为局部斜视图。

## 2 结论与分析

### 2.1 混周期光栅与单一周期光栅的响应光谱

通过对所获得的七种光栅像元台面进行性能测试,图5为它们的归一化响应光谱,表2列出了七

种光栅排布方式所得到的响应半峰宽。对于样品No. 1和No. 2的SMW和SWM结构,可以看到,其响应光谱在 $9.90\ \mu\text{m}$ 处形成了明显的次峰结构,相应地使整体峰形得到最大程度的展宽,半峰宽分别为 $1.91\ \mu\text{m}$ 和 $1.86\ \mu\text{m}$ 。与采用单一M周期光栅的响应半峰宽 $1.20\ \mu\text{m}$ 相比,拓宽了约60%。进一步分析以M光栅单元为中心的MSW和MWS结构的No. 3、No. 4样品发现,其所形成的响应光谱在 $10.60\ \mu\text{m}$ 处形成了主峰,其中No. 3在 $9.90\ \mu\text{m}$ 处形成了较明显的次峰结构。两者的半峰宽分别为 $1.53\ \mu\text{m}$ 和 $1.50\ \mu\text{m}$ ,与单一周期光栅相比,拓宽了约30%。对于以W光栅单元为中心,样品编号为No. 5和No. 6的两个WSM和WMS结构,得到的半峰宽分别为 $1.70\ \mu\text{m}$ 和 $1.50\ \mu\text{m}$ 。相比之下,拓宽了约41%和25%。与国内报道的响应带宽为 $1\ \mu\text{m}$ 的同类型红外探测器相比<sup>[17]</sup>,本研究将探测器工作带宽有效拓展至 $1.49\sim 1.91\ \mu\text{m}$ ,相对带宽扩展率达50%~90%。虽然S. V. Bandara课题组曾通过使用包含多种量子阱的堆叠实现了 $4\ \mu\text{m}$ 范围的宽谱吸收,但是至今未见其应用于焦平面阵列的报道<sup>[16]</sup>。

上述结果表明,所有的混周期光栅台面都能够对响应光谱形成展宽。其中,尺寸最小的S光栅放置在台面中心时起到显著作用,不但在短波端形成了一个明显的次峰,而且长波端也得到了同步展宽。而次中心和外圈的W/M光栅的排布方式对峰形的影响则差别不大。

量子阱像元对入射光的吸收来自于台面光栅对入射光的散射,其电矢量方向由平行于生长平面

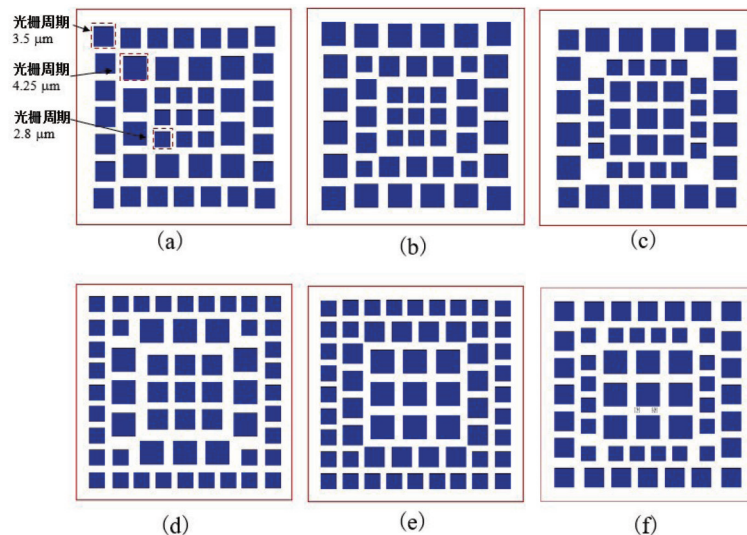


图3 像元台面的混周期光栅结构图:(a) SMW;(b) SWM;(c) MSW;(d) MWS;(e) WSM;(f) WMS

Fig. 3 The mixed-period grating structures of the pixel mesas: (a) SMW; (b) SWM; (c) MSW; (d) MWS; (e) WSM; (f) WMS

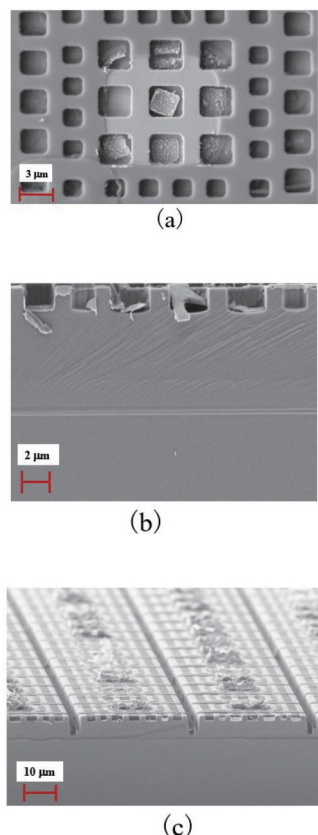


图4 像元光栅俯视、剖面 and 斜视图的 SEM 照片:(a) 光栅结构俯视图;(b) 光栅结构横截面图;(c) 焦平面斜视图

Fig. 4 SEM photographs of the fabricated pixels: (a) top view; (b) cross-section view; (c) oblique view of the focal plane

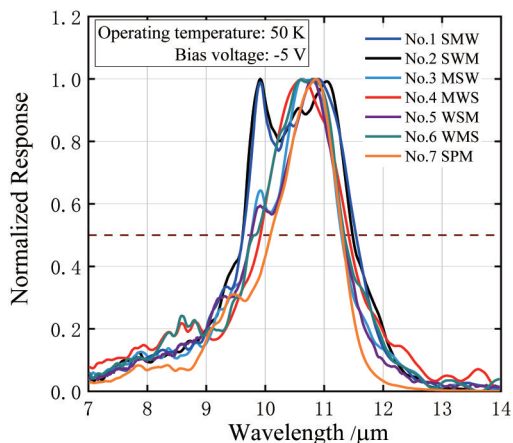


图5 混周期与单一周期光栅 QWIPs 的归一化响应光谱(工作温度为 50 K, 偏压为 -5 V)

Fig. 5 Normalized photoresponse spectra of the mixed-period and single-period grating QWIPs (operating temperature: 50 K, bias voltage: -5 V)

方向转变为具有垂直于生长平面方向的分量。单一周期光栅结构具有均一的周期单元,对应的散射中心波长可以认为只有一个。当引入另外两种光

栅单元后,可以认为台面光栅具有三个散射中心,分别对应更长和更短的中心波长。直观预期,散射中心在台面上所占据的面积越大,起到的散射作用将会越强。

为了研究响应光谱展宽结果与三个散射中心在台面上所占据面积之间的关联性,将各子光栅所占面积的比例也列在表格 2 中。台面总面积为  $28 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m} = 784 \mu\text{m}^2$ ,各子光栅占据面积之和并未达到 100%。由表 2 可见,SMW 和 SWM 结构中,尽管 S 光栅的面积只有 15% 和 10%,却依然能够使响应光谱得到最大的展宽。而在 WMS 结构中,尽管 W 光栅占据了中心区域并且面积占比为 24%,但展宽程度只有  $1.50 \mu\text{m}$ ,说明中心区域的占据并非是光谱展宽的首要因素。

表 2 七种光栅排布方式对应的响应半峰宽、展宽程度及各子光栅占据台面面积的百分比

Table 2 Response half-peak width, broadening degree and percentage of table area occupied by each sub-grating for the seven grating arrangements

样品编号 No.	光栅排布方式	半峰宽/ $\mu\text{m}$	展宽	各光栅周期的面积百分比		
				S	M	W
1	SMW	1.91	60%	15%	16%	54%
2	SWM	1.86	54%	10%	44%	32%
3	MSW	1.53	27%	19%	24%	43%
4	MWS	1.50	24%	37%	16%	24%
5	WSM	1.70	41%	23%	44%	24%
6	WMS	1.50	24%	42%	29%	24%
7	SPM	1.20	0	-	77%	-

## 2.2 光谱拟合及分析

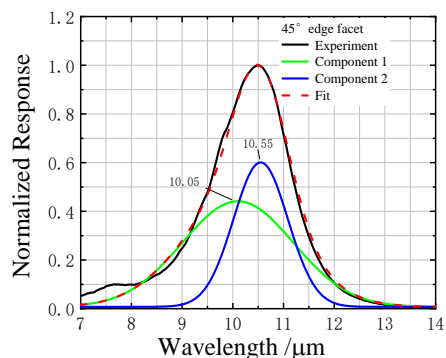
以上分析无法得出光栅面积占比与响应光谱展宽的定量关系,因此对每种结构的响应光谱用高斯线形进行了拟合,以解析出响应光谱中各分量的权重。为了得到量子阱材料的吸收特性,对同一晶圆上同时流片但未制成焦平面的量子阱单元,制备成  $45^\circ$  斜角磨面样品并进行了光谱测试。图 6(a) 为响应光谱和拟合的结果。可以看到,该光谱可以分解成两个子峰,分别位于  $10.05 \mu\text{m}$  和  $10.55 \mu\text{m}$ 。由于  $45^\circ$  斜角磨面样品不存在光栅结构,因此其响应光谱直接反映了材料中的能级结构。拟合结果说明,所用的量子阱材料在激发态上存在两个能级,导致响应光谱的非对称线形可被分解为两个分量。图 6(b) 展示了单一 M 周期光栅的量子阱像元台面的响

应光谱及拟合结果,其线形类似 $45^\circ$ 斜角磨面,也能分解成两个分量,峰位分别位于 $10.10\ \mu\text{m}$ 和 $10.83\ \mu\text{m}$ 。这说明在M光栅中,光栅几何结构的散射峰值与量子阱子带跃迁的峰值相吻合,只是将响应峰位红移了 $0.30\ \mu\text{m}$ 。受到光栅散射带宽的限制,像元台面的响应带宽为 $1.20\ \mu\text{m}$ ,比 $45^\circ$ 斜角磨面的带宽 $1.69\ \mu\text{m}$ 略小。

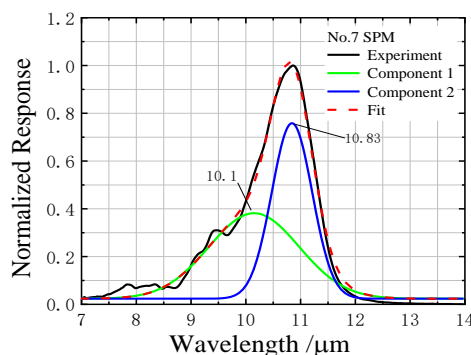
图7(a)和7(b)给出了混周期光栅像元样品1和样品2的SMW结构和SWM结构的响应谱的拟合结果,其余混周期样品的拟合图由于篇幅所限被略去。可以看到,拟合结果能够与实验光谱符合良好。每个混周期光栅的实验光谱均能够被解析成三个拟合分量,表3展示出了每个样品的拟合峰位变化,可以观察到六组混光栅周期样品的拟合峰位1分布在 $9.77\ \mu\text{m}$ 附近,峰位2在 $10.55\ \mu\text{m}$ 附近,峰位3都在 $11.1\ \mu\text{m}$ 附近。由此可见,相较于单一周期的M光栅的两个拟合峰,混周期光栅有三个拟合峰,且拟合峰位基本保持在同一位置。这意味着混周期光栅加入的一大一小光栅周期对光谱进行了调制,小光栅周期影响了峰拟合1的峰位,大光栅周期影响了峰拟合3的峰位。三个分量的相互竞争导致总体响应峰在线形和峰位上发生了变化。

### 2.3 响应光谱的拟合分量所占面积结果对比

为了进一步考察每种光栅周期结构对带宽的影响,统计了混周期光栅光谱拟合各子分量在响应光谱中的积分面积占比,列于表格4中。结合表2中各子光栅的面积可以观察到,SMW结构的S、M、W光栅面积百分比的设计值分别是15%、16%和54%,相对应的光谱拟合面积分别是峰拟合1占比8%,峰拟合2占比77%,峰拟合3占比15%。对比三种峰拟合发现峰拟合2的面积占比最大,其次是峰拟合3,最小的是峰拟合1。同样以S光栅为中心的SWM结构中S、M、W光栅面积百分比的设计值分别是10%、44%和22%。拟合面积的百分比分别是峰拟合1占比6%、峰拟合2占比86%、峰拟合3占比8%。对比三种峰拟合发现,面积占比最大的是峰拟合2,其次是峰拟合3,最小的是峰拟合1。这两种以



(a)



(b)

图6 归一化光电流谱的峰值拟合图:(a) $45^\circ$ 斜角磨面;(b)单一周期光栅结构

Fig. 6 Peak fits of the normalized photocurrent spectra: (a)  $45^\circ$  edge facet; (b) single period grating structure

S光栅为中心的排布结构共同的规律:尽管M结构面积占比不是最大值,但光谱拟合中的积分面积都是占比最大值。此外,S光栅结构设计面积占比低于W光栅结构,与此对应S光栅结构的拟合面积也低于W光栅结构的拟合面积。分析了另外四种MSW、MWS、WSM和WMS样品的光栅面积百分比与光谱拟合结果,发现与上述规律一致。因此,在每一组样品中峰拟合2面积占比都是最大值,S光栅和W光栅在同一个像元上时,光栅结构面积占比越

表3 样品1~7的拟合峰位

Table 3 Fitting peaks of Samples 1-7

样品编号 No.	1	2	3	4	5	6	7
拟合峰位1/ $\mu\text{m}$	9.85	9.80	9.62	9.70	9.67	9.67	10.10
拟合峰位2/ $\mu\text{m}$	10.55	10.55	10.48	10.55	10.53	10.55	10.83
拟合峰位3/ $\mu\text{m}$	11.10	11.11	11.11	11.11	11.11	11.10	-

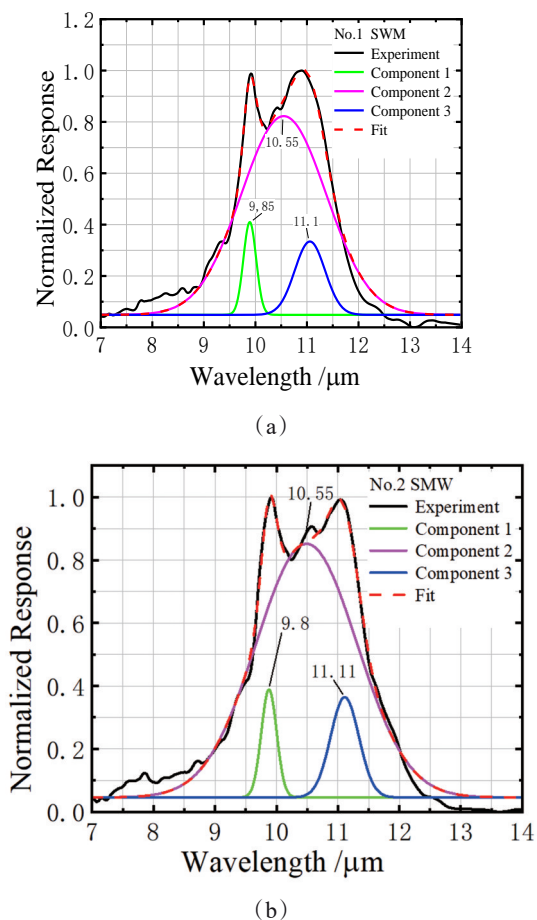


图7 混周期光栅结构的归一化光电流谱的峰值拟合图:(a) SMW;(b)SWM

Fig. 7 Peak fits of the normalized photocurrent spectra of the mixed-period grating structures: (a) SMW; (b) SWM

大,相对应拟合峰的积分面积就越大。

以上拟合结果是合理的,因为量子阱材料的本征吸收所对应的响应波长是 10.55  $\mu\text{m}$ ,拟合峰位 2 包含了量子阱子能级之间跃迁的最大几率,

并且 M 光栅的周期就是针对该波长设计的,使其在 10.55  $\mu\text{m}$  处散射效率最高,这解释了其在光谱拟合的积分面积占比中占据主导地位的现象。S 光栅和 W 光栅在同一个像元上时,光栅结构面积占比越大,相对应峰的积分面积就越大。因此,散射中心在台面上所占据的几何面积越大,其起到的散射作用越强。具体而言,这种子光栅所占面积的相对变化将引起光谱中所对应的子分量的强度发生相对变化,最终导致响应光谱整体发生变化,线形得到展宽。

### 2.4 黑体响应率结果对比

由前文可知,混光栅周期的设计在一定程度上可以实现光谱的拓宽,但是拓宽光谱的同时不应导致其探测性能的下降。表 5 给出了七组样品的黑体响应率,可以看到 No. 7 单一周期光栅的黑体响应率是最大的,达到了 0.116 A/W。而混周期光栅结构的黑体响应率则在 0.09~0.1 A/W 附近,并没有因为光谱的拓宽而引起明显下降,并且与国内报道的同类探测器的黑体响应率相当<sup>[18]</sup>。

### 3 结语

本文针对量子阱像元台面的光栅结构对响应光谱带宽的影响进行了研究。在单一周期光栅的基础上增加和减少光栅周期,使像元台面上集成了三种光栅结构。尝试了六种不同的混周期光栅布局,每一种都能够实现探测器响应波段的拓展。相比于单一周期光栅,混周期光栅的响应波段最高展宽了 60%。在探测器性能方面,单一周期光栅的散射效率应为最高,黑体响应率也最高。偏离单一周期光栅的设计应该导致散射效率的下降,从而导致黑体响应率的降低。但从本文的实验结果来看,在带宽得到拓展的同时,黑体响应率仅下降 12%。为

表 4 样品 1~6 的光栅占比和光谱拟合的积分面积占比

Table 4 The proportion of the sub-grating area-occupation and the integrated area in the spectrum fitting of Samples 1-6

样品编号 No.	光栅排布方式	峰拟合 1 面积占比	峰拟合 2 面积占比	峰拟合 3 面积占比	光栅周期	光栅周期	光栅周期
					2.8 $\mu\text{m}$ 在单 个像元的面积 占比	3.5 $\mu\text{m}$ 在单 个像元的面积 占比	4.25 $\mu\text{m}$ 在单 个像元的面积 占比
1	SMW	8%	77%	15%	15%	16%	54%
2	SWM	6%	86%	8%	10%	44%	32%
3	MSW	18.7%	57.5%	23.9%	19%	24%	43%
4	MWS	28.4%	49%	22.6%	37%	16%	24%
5	WSM	26.7%	46%	26.7%	23%	44%	24%
6	WMS	31.4%	49.5%	19%	42%	29%	24%

表5 样品1~7的黑体响应率

Table 5 Blackbody responsivity of Samples 1-7

样品编号 No.	1	2	3	4	5	6	7
黑体响应率/ (A/W)	0.102	0.104	0.1	0.092	0.087	0.087	0.116

了分析混周期中各光栅周期单元对光谱的影响,本文对单一周期光栅和混周期光栅的光电流谱进行了高斯线形拟合。拟合结果发现,混周期光栅因包含三种不同周期结构,使光电流谱在三个特征峰位存在三条拟合曲线子分量,而单一周期光栅的拟合只有两个子分量。这证实了三种混周期光栅结构的设计引入了三种不同中心波长的散射中心,各散射中心的强度随光栅排布方式的改变呈现可调控特性,但都能够在一定程度上实现了光谱响应范围的拓展。该现象与固体物理中无序结构引发能谱展宽的原理是一致的。本方法具有显著的工艺兼容优势:无需对焦平面工艺进行任何调整,只需通过对光栅图形进行优化设计,就能够实现较大光谱展宽。基于现有的量子阱材料,其子能级之间只有一个主要的跃迁峰,若优化光栅排布比例(例如:增加S光栅和W光栅在台面上所占据的面积,减少甚至取消M光栅),有望获得最大程度的展宽。此外,后续可以通过能带工程,设计更宽响应的量子阱材料<sup>[19]</sup>,例如在单个周期的量子阱中包含有多个不同深度的阱,结合本文的混周期结构,有望实现更宽的光谱响应。

## References

- [1] Lu W, Li N, Zhen H L, et al. A new family in infrared optoelectronics: Quantum well infrared photodetectors [J]. *Science in China Series G: Physics Mechanics and Astronomy*, 2009, 03: 336-343.  
陆卫, 李宁, 甄红楼, 等. 红外光电子学中的新族——量子阱红外探测器[J]. *中国科学(G辑:物理学力学天文学)*, 2009, 03: 336-343.
- [2] Zhao J, Jiang H R, Feng J L, et al. Multicolor long-wavelength QWIPs based on double metal - dielectric - metal layers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2024, 41: 2272-2279.
- [3] Wang W X, Jia H Y, Li D A, et al. Research status and application of GaAs/AlGaAs multi-quantum well detectors [J]. *Laser Journal*, 2018, 39(1): 1-7.  
王文鑫, 贾华宇, 李灯熬, 等. GaAs/AlGaAs多量子阱探测器研究现状与应用[J]. *激光杂志*, 2018, 39(1): 1-7.
- [4] Harald S, Liu H C. Quantum well infrared photodetectors: physics and applications[J]. *Book*, 2007.
- [5] Rogalski A. Quantum well photoconductors in infrared detector technology[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(8): 4355-4391.
- [6] Su J P, Zhou X H, Tang Z, et al. Material characterization

and performance study of non-uniform GaAs/AlGaAs quantum well infrared detectors[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, 43(01): 7-14.

苏家平, 周孝好, 唐舟, 等. 非均匀GaAs/AlGaAs量子阱红外探测器材料表征和器件性能研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2024, 43(01): 7-14.

- [7] Choi K K, Jhabvala M D, Sun J, et al. Resonator-quantum well infrared photodetectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(20): 201113.
- [8] Sarusi G, Levine B F, Pearton S J, et al. Optimization of two dimensional gratings for very long wavelength quantum well infrared photodetectors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, 76(9): 4989 - 4994.
- [9] Levine B F. Quantum-well infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(8): R1-R81.
- [10] Weber E R, Liu H C, Willardson R K. Semiconductors and semimetals: intersubband transitions in quantum wells physics and device applications [M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [11] Weng Q C, Li L, Chen J, et al. Study of metal grating coupling in long-wavelength quantum well infrared photodetectors: Based on surface plasmon effects [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(05): 415-418.  
翁钱春, 李梁, 陈俊, 等. 长波量子阱红外光电探测器金属光栅耦合的研究——基于金属表面等离子效应 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(05): 415-418.
- [12] Li X Y, Li N, Xu J T, et al. GaAs/AlGaAs quantum well long-wavelength 10.55  $\mu\text{m}$  infrared focal plane detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(01): 77-82.  
李向阳, 李宁, 许金通, 等. 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(01): 77-82.
- [13] Liu W W, Jiang X Y, Xin R, et al. Enhanced response over wavelength range of 7-12  $\mu\text{m}$  for quantum wells in asymmetric micro-pillars [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(12): 20669-20681.
- [14] Bandara S V, Gunapala S D, Liu J K, et al. 10-16  $\mu\text{m}$  Broadband quantum well infrared photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(19): 2427-2429.
- [15] Bandara S V, Gunapala S D, Liu J K, et al. Tuning and tailoring of broadband quantum-well infrared photodetector responsivity spectrum [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(15): R1-282.
- [16] Schneider H, Liu H C. Quantum well infrared photodetectors: Physics and applications [M]. *Book*, 2007.
- [17] Du W, Wang J Q, Li N, et al. Effect of the grating shape on the response spectrum of quantum well infrared detector focal plane array [J]. *Optics Communications*, 2023, 546: 129762.
- [18] Shi Y L. 320 $\times$ 256 GaAs/AlGaAs quantum well infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 42-44, 101.  
史衍丽. 320 $\times$ 256 GaAs/AlGaAs量子阱红外探测器 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 42-44, 101.
- [19] Liu H, Li N, Zhou X H. Design of enhanced broadband optical couplers for long-infrared quantum well infrared photodetectors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2025, 137(3): 033106.