

基于选区外延技术的单片集成阵列波导光栅与单载流子探测器的端对接设计

叶焱 韩勤 吕倩倩 潘盼 安俊明 王玉冰 刘荣瑞 侯丽丽

Butt-joint design in a uni-traveling carrier photodiode array monolithic with an arrayed waveguide grating by the selective area growth technique

Ye Han Han Qin Lü Qian-Qian Pan Pan An Jun-Ming Wang Yu-Bing Liu Rong-Rui Hou Li-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 158502 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.158502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.158502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

室内可见光通信复合光学接收端设计与分析

[Design and analysis of composite optical receiver for indoor visible light communication](#)

物理学报.2017, 66(8): 084207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084207>

基于连续扫频光时域反射的全同弱光栅高速解调方法

[High speed demodulation method of identical weak fiber Bragg gratings based on wavelength-sweep optical time-domain reflectometry](#)

物理学报.2016, 65(20): 204209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204209>

多光谱可见光通信信道串扰分析

[Analysis of channel crosstalk in muliti-spectrum visible light communication system](#)

物理学报.2016, 65(9): 094208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094208>

光波导脉冲耦合器研究

[Study on pulse coupler of optical waveguide](#)

物理学报.2014, 63(1): 014211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014211>

单载流子传输的双异质结光敏晶体管探测器的研究

[Uni-traveling-carrier double heterojunction phototransistor photodetector](#)

物理学报.2013, 62(22): 228501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.228501>

基于选区外延技术的单片集成阵列波导光栅与单载流子探测器的端对接设计*

叶焱¹⁾ 韩勤^{1)2)†} 吕倩倩¹⁾ 潘盼¹⁾ 安俊明¹⁾³⁾ 王玉冰¹⁾
刘荣瑞¹⁾ 侯丽丽¹⁾

1) (中国科学院半导体研究所, 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

2) (中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

3) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

(2017年3月30日收到; 2017年5月7日收到修改稿)

选区外延技术是实现有源与无源光器件单片集成的一种有效的工艺手段, 但同时对两种器件在异质生长界面处的对接结构提出了更高的设计要求. 本文通过选区外延技术实现了 InP 基 O 波段 4 通道阵列波导光栅与单载流子探测器的单片集成. 通过光学仿真重点研究了选区外延后界面处形貌对无源波导结构与有源光探测器间光耦合效率的影响, 包括伸长的光学匹配层、二次外延生长边界位置、波导刻蚀边界位置等因素. 研究表明, 在保证二次外延生长边界对准异质对接界面时, 将光学匹配层伸出探测器前端 10 μm 并与外延边界无缝对接既可以保证高效的光传输效率 (或探测器量子效率), 又可以避免外延界面处的异常生长对器件制备工艺的影响, 保证生长工艺与器件制备工艺的兼容性. 成功制备的单片集成芯片具有高达 76% 的探测器量子效率, 证明了对接方案的有效性. 同时, 集成芯片的低串扰 (< -22 dB) 与解复用特性展示出其作为解复用光接收芯片具有巨大潜力.

关键词: 单片集成, 阵列波导光栅, 单载流子探测器, 选区外延

PACS: 85.60.Dw, 42.82.Bq, 42.79.Sz

DOI: 10.7498/aps.66.158502

1 引言

近年来, 人们对光纤通信系统传输容量的需求不断增长, 集成光电芯片, 尤其是适于波分复用的收发芯片, 也因此得到了大量研究与快速发展^[1-3]. InP 基光子集成回路是最具潜力的解决方法, 其优势在于能够单片集成多种有源与无源光器件, 如激光器、调制器、放大器、探测器与 (解) 复用器等^[4-6], 能够大大降低器件尺寸、封装成本以及芯片间光传输损耗.

从光接收端的角度来说, 单片集成解复用器的光电探测器芯片能够实现对多信道光信号的

直接解复用探测. 阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 是最适合于单片集成的解复用器^[7,8], 它具有良好的波长分辨率、设计灵活性、较小的弯曲半径以及偏振无关性等优点. 由于研究较为成熟并广泛应用的 PIN 型探测器在面对不断增长的传输速率要求时暴露出低带宽与低线性度等不足之处, 一种单载流子探测器 (uni-traveling carrier photodiode, UTC-PD) 的新型结构应运而生^[9]. 它将吸收区与载流子漂移区 (收集区) 分离, 从而实现只有漂移速度更快的电子渡越本征区的目的, 有效降低了空间电荷效应的影响, 实现大带宽与高线性度的要求, 也因此受到了广泛的关注与

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2015AA016902)、国家重点研发计划 (批准号: 2016YFB0402404) 和国家自然科学基金 (批准号: 61635010, 61674136, 61435002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hanqin@semi.ac.cn

研究 [10–12].

随着半导体技术的飞速发展, 先进的材料生长技术也在不断促进单片集成工艺的发展. 选区外延 (selective area growth, SAG) 技术由于能最大程度地实现不同区域的不同器件结构与不同掺杂水平的结合以及器件设计的灵活性, 成为多功能器件单片集成的最有效的工艺方法之一 [13–15]. 目前对于 InP 基单片光电集成研究, 一方面在发展适于集成的光电器件及提高器件的性能, 另一方面是在发展材料兼容、结构兼容的集成结构和方法, 特别是解决无源波导器件与有源光收发器件间的光传输与耦合问题, 实现高效的兼容集成 [16–18].

采用倏逝波耦合方式能够实现波导结构与探测器的高效光耦合 [19,20]. 但单片集成芯片要求最大限度地减小无源波导的传输损耗, 对波导结构的光限制能力要求更高, 而一次性外延生长难以同时保证波导内的强光场限制与探测器的高量子效率. 基于 SAG 技术的端对接 (butt-joint) 集成方法可以有效解决这一问题. 然而 SAG 会导致在外延界面处的材料异常生长而破坏理想的对接结构形貌, 所以在器件设计时需要充分考虑 SAG 后界面形貌对光传输与耦合效率的影响.

本文研究 AWG 与倏逝波耦合型 UTC-PD 的单片集成方法, 建立集成芯片对接处的光学仿真模型, 通过器件中光场电矢量强度分布与有源区吸收效率系统地研究 SAG 对接界面形貌对光耦合效率 (亦探测器量子效率) 的影响. 采用优化的界面对接方法与结构参数同时实现了 80% 的模拟量子效率以及 SAG 技术与 PD 制备工艺良好的兼容性. 实验

上成功制备出 AWG 与 UTC-PD 集成芯片, 其性能也很好地验证了该集成方案的有效性.

2 模拟与设计

单片集成 AWG-UTC 结构的端对接结构如图 1 所示: 它由一段 AWG 输出单模波导通过耦合区与探测器台面相连. PD 区从探测器台面的前端面开始, 包含了完整的台面结构: 由下至上依次为 N 接触层 (亦为光学匹配层)、收集区、吸收区、电子阻挡层以及 P 接触层. 耦合区通过伸长的光学匹配层与 AWG 的上包层连接. 整个芯片通过一次外延生长出 AWG 结构的下包层、芯层以及完整的探测器层结构, 而 AWG 的上包层则通过 SAG 生长在 AWG 区域的芯层上. AWG 结构为 4 通道、O 波段、20 nm 的信道间隔, 并采用“深脊型”波导结构降低器件尺寸与偏振相关性 [8]. 输出单模波导宽度为 2.7 μm . SAG 前的外延结构列于表 1, 表中 U.I.D 表示在材料生长过程中不掺杂杂质.

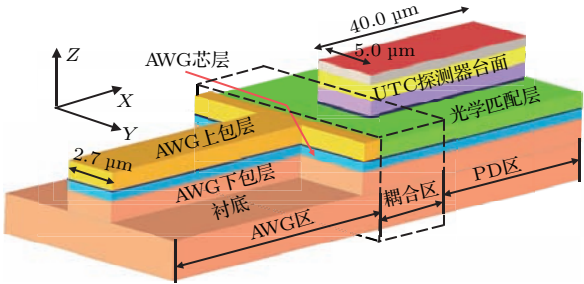


图1 AWG-UTC 端对接结构示意图
Fig. 1. AWG-UTC butt-joint schematic.

表1 选区生长前的一次外延结构
Table 1. Epitaxial structure before SAG.

组分	厚度/nm	掺杂	$n@1310\text{ nm}$	功能
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	30	P^+	$3.65-\text{i}0.148$	P 接触
InP	300	P	3.21	电子阻挡层
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	590	P 渐变掺杂	$3.65-\text{i}0.148$	吸收层
$\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.485}\text{P}_{0.515}$	470	N^-/I	3.42	收集层
InP	100	N	3.21	杂质扩散层
$\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.485}\text{P}_{0.515}$	500	N^+	3.42	光匹配层
InP	150	U.I.D	3.21	截止层
$\text{In}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.21}\text{P}_{0.79}$	500	U.I.D	3.298	芯层
InP	1000	U.I.D	3.21	下包层

光学仿真平台为专业软件FDTD-Solutions. 在AWG输出波导中采用两个正交偏振(TE, TM)的基模光源作为输入光场. 通过直接考察探测器的量子效率即可说明耦合区与探测器间的光耦合效果. 探测器吸收区内单位体积的吸收功率 P_{abs} 由下式决定:

$$P_{\text{abs}} = -\frac{1}{2} \cdot \text{Re}(\nabla \cdot \mathbf{P}) = -\frac{1}{2} \omega |\mathbf{E}|^2 \text{Im}(\epsilon), \quad (1)$$

其中, $\mathbf{P}$ 为Poynting矢量, ω 为光波角频率, $|\mathbf{E}|$ 为电场矢量的模, ϵ 为材料的介电系数, 由材料折射率决定. 将 P_{abs} 在吸收区内($5 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m} \times 0.59 \mu\text{m}$)求和即可算出总吸收功率, 其与光源功率的比值即为探测器的量子效率(假设100%理想的光电转化效率).

2.1 伸长的光学匹配层对量子效率的影响

首先在伸长的匹配层完全覆盖耦合区(图2(a))与不伸长的匹配层对齐到PD台面前端(图2(b))两种情况下分别模拟器件内的光学传输情况. 其中, 耦合区被匹配层完全覆盖的长度记为 L_c , 而匹配层不伸出时的耦合区长度记为 L_n .

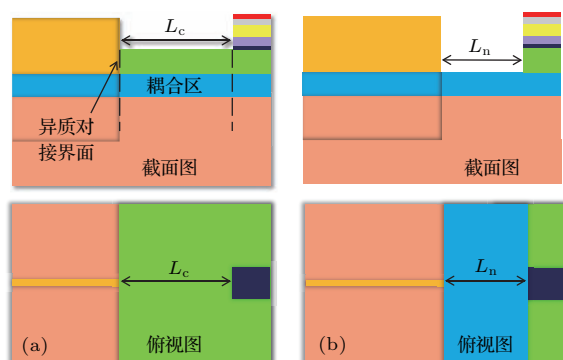


图2 光学匹配层情况 (a) 伸入并覆盖耦合区; (b) 未伸入耦合区

Fig. 2. Coupling region (a) with and (b) without extended coupling layer.

图3示出了两种情况下TE模激励的器件中轴面内($Y = 0$)电学矢量归一化强度分布. 从图3(a)和3(b)可观察到光场进入耦合区后会在芯层与匹配层中互相耦合, 其强度由于光场的横向扩展而随传输距离逐渐降低. 而匹配层未伸出的对比情况(图3(c))则显示不同的光场路径: 耦合区芯层内电学矢量强度相比AWG区内出现了一定程度的下移, 并且在下包层内也出现了相对强度约0.5的电学矢量分布; 同时, 在波导输出端位置出现了较明显的光场泄漏. 图4进一步示出了两种情况下耦合区内器件横截面内的电学矢量分布. 对比看出, 伸

出的匹配层有效地降低了光场在耦合区前端向上两个方向的泄漏. 光场泄漏源于芯层上的材料由高折射率(3.2)的上包层InP突变成低折射率(1.0)的空气, 而导致光场模斑不匹配. 对于暴露着芯层的耦合区而言, 光斑位置相比AWG区更靠近下包层, 所以会产生光场路径的向下移动.

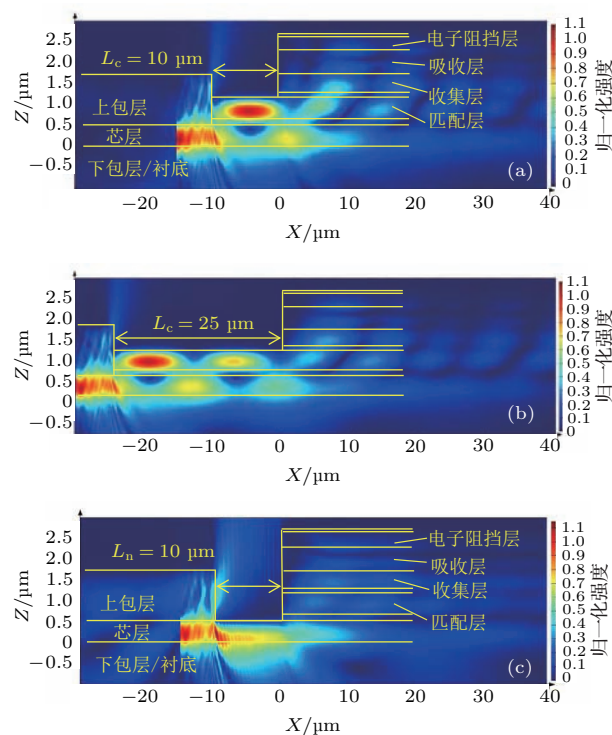


图3 TE基模光源下两种情况的器件中轴面电学矢量归一化(至光源)强度分布图 (a) $L_c = 10 \mu\text{m}$; (b) $L_c = 25 \mu\text{m}$; (c) $L_n = 10 \mu\text{m}$

Fig. 3. Electrical vector distributions under fundamental TE mode source in the medial surface: (a) $L_c = 10 \mu\text{m}$; (b) $L_c = 25 \mu\text{m}$; (c) $L_n = 10 \mu\text{m}$.

图5进一步定量地示出了两种情况下探测器量子效率随耦合区长度的变化曲线. 无论匹配层是否伸出, 由于光场在耦合区的横向扩展, 量子效率均随匹配层的伸长而降低. 明显不同的是伸长的匹配层保证了量子效率更平缓地下降, 并在 $7.5 \mu\text{m} < L_c < 15.0 \mu\text{m}$ 范围内稳定维持在80%. 而匹配层未伸出时, 耦合区前端的模斑失配将导致量子效率骤降近30%, 且损耗在垂直偏振方向的TM基模激励下更大. 所以, 将二次外延的AWG上包层与伸长的匹配层直接对接更有利于光场的稳定传输, 同时也允许器件制备时有更大的工艺容差. 我们将匹配层伸出的距离定为 $10 \mu\text{m}$, 既保证了量子效率在一定的刻蚀误差范围内仍然能保持稳定, 又能将PD台面尽量拉远外延边界, 避免SAG的影响.

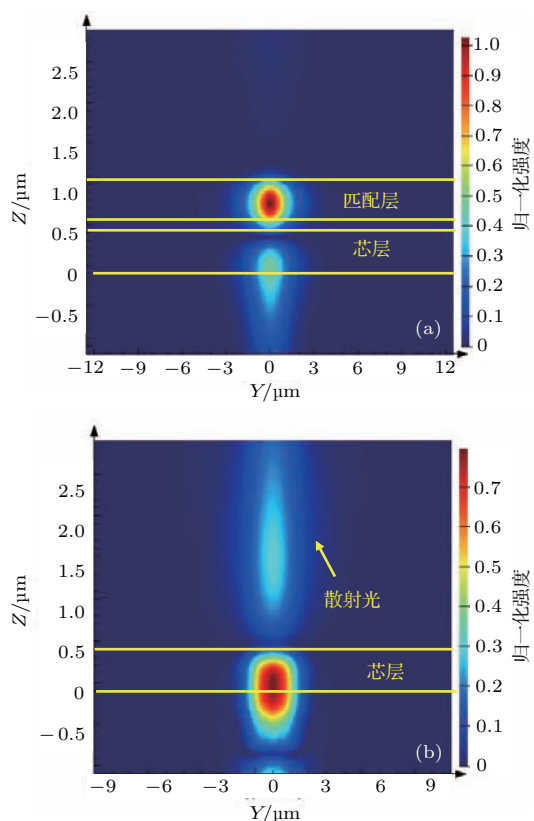


图4 耦合区横截面内电学矢量归一化强度分布图 (a) $L_c = 10 \mu\text{m}$, PD 台面 6 μm 处; (b) $L_n = 10 \mu\text{m}$, PD 台面 8 μm 处

Fig. 4. Cross sections of electrical vector distribution at (a) 6 μm before PD mesa ($L_c = 10 \mu\text{m}$) and (b) 8 μm before PD ($L_n = 10 \mu\text{m}$).

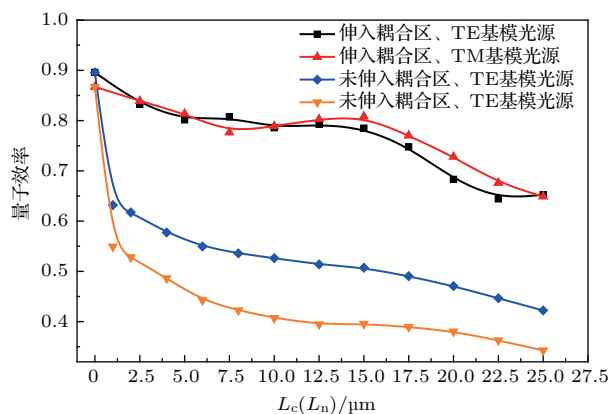


图5 量子效率随耦合区长度的变化

Fig. 5. Quantum efficiency with increasing coupling region length.

2.2 二次外延生长边界位置对光传输的影响

在器件制备中, 二次外延边界相对于耦合区前端位置的偏移可通过调节外延前的掩膜边界位置确定. 此小节进一步讨论该偏移距离对光传输的影

响. 如图6所示, 在耦合区长度为10 μm 情况下, 以耦合区前端为原点, 偏移距离记为 L_e , 方向以数值正负性区分.

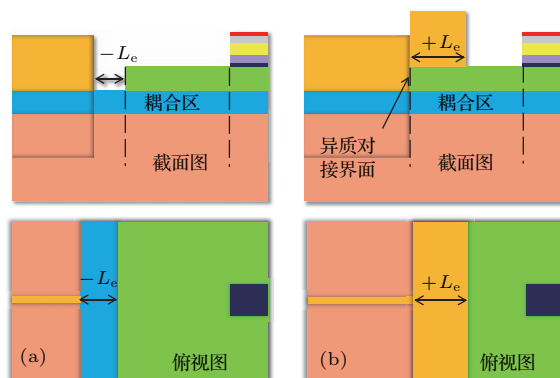


图6 二次外延边界位置 (a) 停在AWG区内; (b) 伸入耦合区内

Fig. 6. Regrowth edge located at (a) AWG region and (b) coupling region.

图7给出了量子效率随 L_e 长度的变化. 在 $L_e < 0$ 范围内(即外延边界停在耦合区前), 量子效率同样由于裸露芯层而产生了骤降. 而在 $L_e > 0$ 时, 量子效率出现了剧烈的周期性振荡趋势, 在5 μm 偏移距离下效率下降了近20%至最低值, 但随后又继续回升直到 $L_e = 10 \mu\text{m}$ 时恢复至最大值85%. 此时上包层理想地对接在PD台面前端. 我们进一步将耦合区长度延伸至20 μm 观察更大偏移量范围内的效率变化. 不难发现, 在 $0 < L_e < 10 \mu\text{m}$ 范围内, 效率曲线的变化趋势与 $L_c = 10 \mu\text{m}$ 情况下相同, 只是整体效率有10%的下降. 但在 $10 \mu\text{m} < L_e < 20 \mu\text{m}$ 范围内又出现了第二个效率谷值47% ($L_e = 15 \mu\text{m}$), 并且同样在上包层对接至PD台面时 ($L_e = 20 \mu\text{m}$) 恢复到最大值.

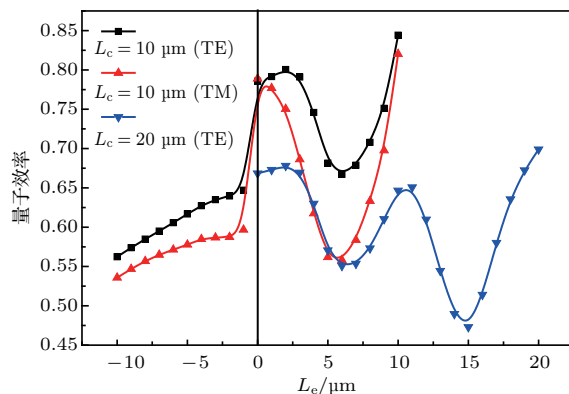


图7 量子效率随外延边界偏移距离的变化

Fig. 7. Quantum efficiency with increasing L_e .

再次分析器件中轴面内的电学矢量强度分布, 如图8所示. 图中选取 $L_c = 20 \mu\text{m}$ 曲线中的两个谷值 ((a) $L_e = 6 \mu\text{m}$, (c) $L_e = 15 \mu\text{m}$) 与两个峰值 ((b) $L_e = 10 \mu\text{m}$, (d) $L_e = 20 \mu\text{m}$) 效率处的分布情况. 观察发现, 两个谷值处分布的共同点是二次外延边界正好处于光场强度集中在匹配层中的位置, 即上包层折射率的突变发生在光场强度集中在

匹配层中时. 反观两个峰值效率情况, 二次外延边界位置正好处在光场集中在芯层的位置, 所以未对匹配层中的光场分布造成扰动, 光路继续向匹配层稳定传输并耦合进PD台面. 与裸露芯层的情况类似, 上包层的突变导致了量子效率的强烈变化, 不同之处在于此时的效率变化由于多模波导的存在而略显缓慢, 但仍然无法保证较好的工艺容差.

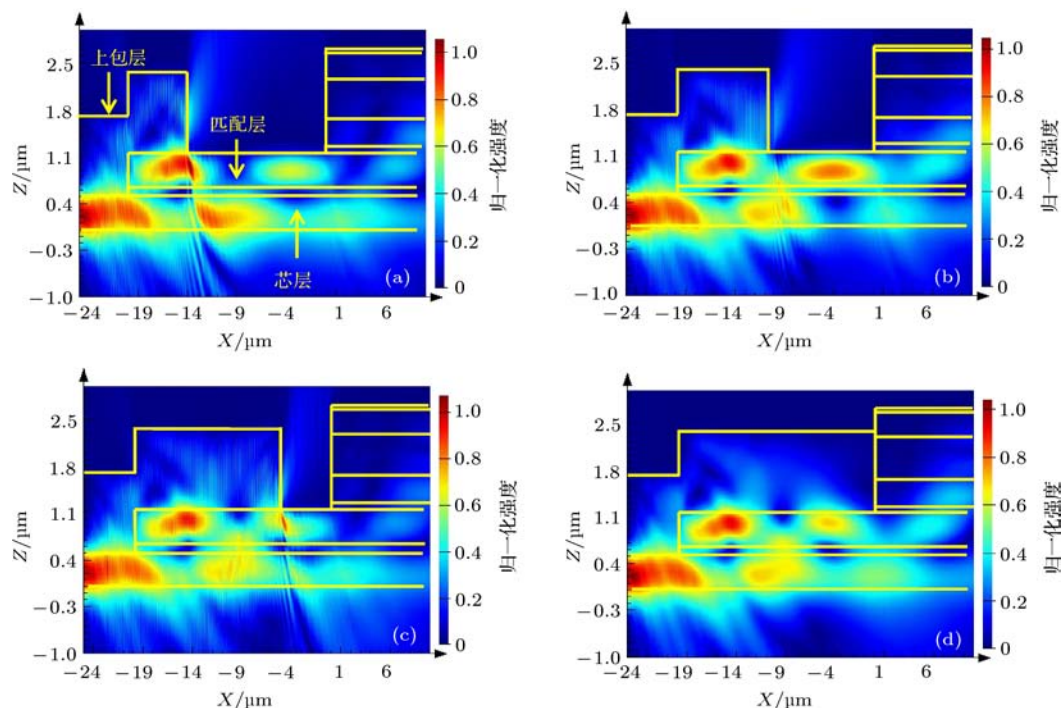


图8 TE基模光源、 $L_c = 20 \mu\text{m}$ 下器件中轴面电学矢量强度分布 (a) $L_e = 6 \mu\text{m}$; (b) $L_e = 10 \mu\text{m}$; (c) $L_e = 15 \mu\text{m}$; (d) $L_e = 20 \mu\text{m}$

Fig. 8. (color online) Electrical vector distributions at the medial surface under fundamental TE mode source at $L_c = 20 \mu\text{m}$ with: (a) $L_e = 6 \mu\text{m}$; (b) $L_e = 10 \mu\text{m}$; (c) $L_e = 15 \mu\text{m}$; (d) $L_e = 20 \mu\text{m}$.

虽然在上包层直接对接PD台面时量子效率有最大值, 但此情况太过理想, 实际制备中不可避免地会造成异常生长进入PD台面而影响后续工艺. 因此, 最佳选择是将二次外延生长边界对准对接界面. 这表明, 需要将SAG掩膜边界与对接界面对齐以保证最大的量子效率.

2.3 AWG刻蚀边界位置对光传输的影响

AWG刻蚀边界的位置也会影响对接处形貌, 如图9所示. 图9(a)表示刻蚀边界停在AWG区内, 而图9(b)表示刻蚀边界进入耦合区, 造成一段波导尺寸的耦合区形貌. 同样以对接界面为原点, 偏移距离以 L_m 表示.

刻蚀边界偏移距离对量子效率的影响示于图10中. 相比于前两种情况, 该偏移对效率的影响

很小, 在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 的范围内只造成最多6%的效率降低. 而在制备中, AWG的光刻误差可以轻松控制在此范围内, 所以不会造成明显的效率变化.

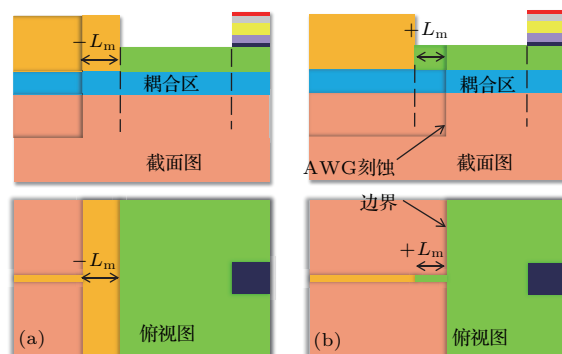


图9 AWG刻蚀边界位置 (a) 停在AWG区内; (b) 伸入耦合区内

Fig. 9. AWG etching edge at (a) AWG region and (b) coupling region.

从图 10 还可观察到, $L_m > 0$ 后量子效率有缓慢上升趋势, 但这不能作为提高效率的有效途径. 因为实际情况中上包层会伸入匹配层上的掩膜上, 导致较高的异常生长“脊”, 而无法保证匹配层上的光刻精度.

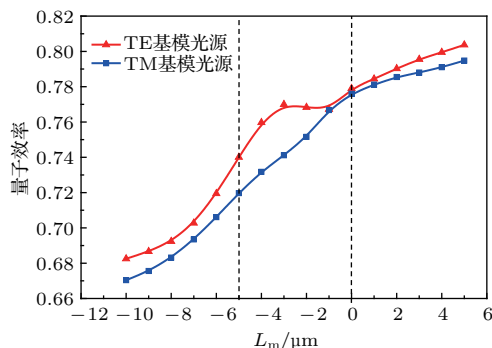


图 10 量子效率随 AWG 刻蚀边界偏移距离的变化
Fig. 10. Quantum efficiency with increasing L_m .

2.4 探测器折射率对量子效率的影响

高探测器量子效率不仅需要尽量小的端对接耦合损耗, 还需要合理优化探测器结构参数. 模拟选取对光耦合最重要的匹配层折射率与收集层折射率作为优化目标参量. 与传统 PIN 结构不同, UTC-PD 的吸收层与光匹配层被低折射率的收集层隔开, 光场不再直接从匹配层耦合至吸收层 (PIN 结构中的本征层), 匹配层与收集层的折射率将直接影响探测器的量子效率.

图 11 与图 12 分别为量子效率随匹配层参数与收集层折射率的变化曲线. 图 11 的优化选取收集层折射率为 3.42, 而图 12 的优化同样选取匹配层的折射率为 3.42. 可以看到, 匹配层折射率大于 3.34 后均能保证较高的量子效率, 区别在于效率随耦合区长度变化的振荡幅度: 折射率越大, 振荡越明显, 但却能在较短的距离下进入效率的平缓区. 而收集层折射率对效率的影响则非常显著, 在接近 InP 折射率的 3.22 处效率只有 10%—15%, 折射率增加到 3.42 时效率迅速提高至 80%. 因此, 本次实验确定的匹配层折射率与收集层折射率均为 3.42, 预期达到的量子效率为 80%.

需要指出, 匹配层与收集层的带隙宽度需至少大于入射光子能量. 与 InP 晶格匹配的 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 化合物的折射率和折射率随组分的关系可通过经验拟合公式确定^[21], 其在 O 波段的变化曲线如图 13 所示. 对于最大的入射光子

能量 0.984 eV, 折射率的最大取值为 3.55 ($1.26 \mu\text{m}$) 与 3.44 ($1.36 \mu\text{m}$), 才能保证匹配层与收集层基本无光吸收. 本文所用折射率为 3.42 ($1.31 \mu\text{m}$), 对应 As 组分为 $y = 0.485$, Ga 组分为 $x = 0.223$.

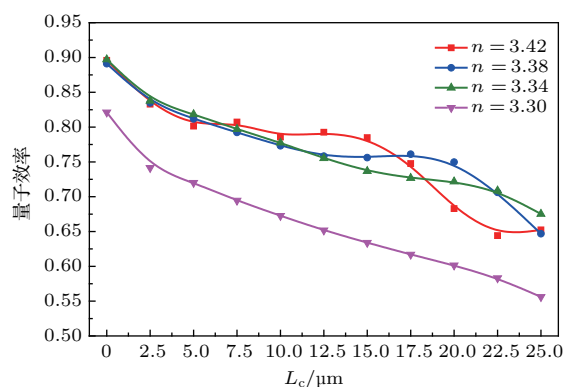


图 11 TE 基模光源、不同匹配层折射率下量子效率随耦合区长度的变化

Fig. 11. Quantum efficiencies with increasing L_c at different coupling layer refractive indices under fundamental TE mode source.

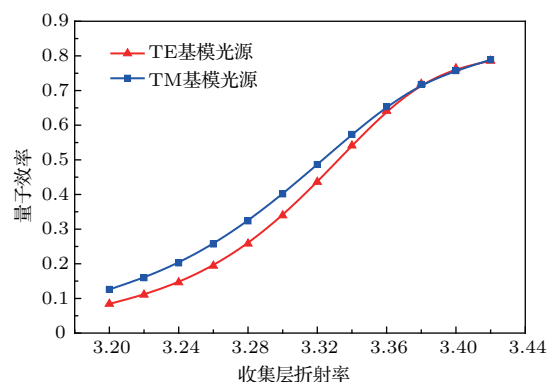


图 12 量子效率随收集层折射率的变化

Fig. 12. Quantum efficiency with increasing collector refractive index.

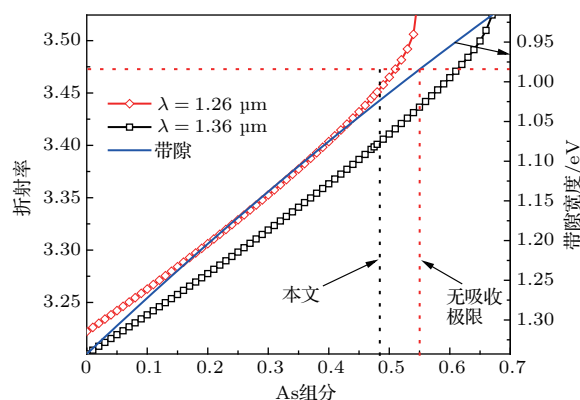


图 13 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 折射率与带隙宽度随 As 组分的变化

Fig. 13. $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ refractive index and band-gap curves with increasing As composition.

3 制备与测试

集成芯片的制备思路为: 在外延生长前先干法刻蚀PD台面, 并湿法腐蚀掉AWG区域内的外延掩膜与匹配层(图14(a)); 然后SAG 1.2 μm 的本征InP上包层(图14(b))并去除掩膜; 接着完成PD的剩余工艺; 最后进行AWG结构的深脊刻蚀与解理. 图15为制备过程中的扫描电子显微镜照片. SAG工艺会导致对接界面附近出现异常生长的脊型结构, 如图15(a)所示. 上包层延伸进入掩膜4.6 μm , 并且高度3.8 μm . 这也是在设计时将PD台面通过匹配层拉远外延边界以避免影响后续光刻等工艺精度的原因. 从图15(a)中同样可观察到耦合层与掩膜的边界恰好对齐. 图15(b)—(d)分别展示了PD探测器的结构、AWG结构和连接着输出波导的探测器俯视图. 图16为集成芯片的显微镜图, 整个芯片尺寸为4.5 mm $\times$ 1.2 mm. 可观察到波导尾端距离PD台面有9.6 μm 的距离, 符合设计的耦合区长度.

进一步通过探测器的光响应测试结果验证耦合方案的有效性. 测试采用O波段可调谐激光器

调节AWG的输入波长, 采用半导体参数测试仪收集探测器的光电流信号. 我们分别测试了-3 V偏压下AWG-UTC集成芯片的频谱响应(光耦合于图16中的AWG输入波导端)与解理AWG后的波导耦合器件响应度(光耦合于图15(d)的输出波导端). 两者的差值为AWG结构的片上损耗. 测试结果列于表2.

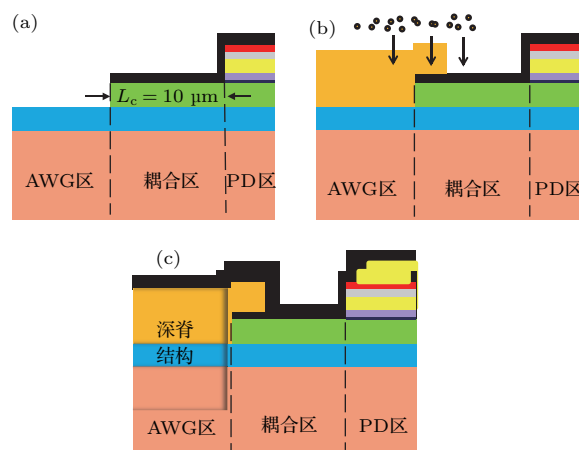


图14 集成芯片关键工艺步骤 (a) 二次外延前; (b) SAG工艺; (c) 二次外延后

Fig. 14. Key steps of device fabrication: (a) Before regrowth; (b) SAG process; (c) after regrowth.

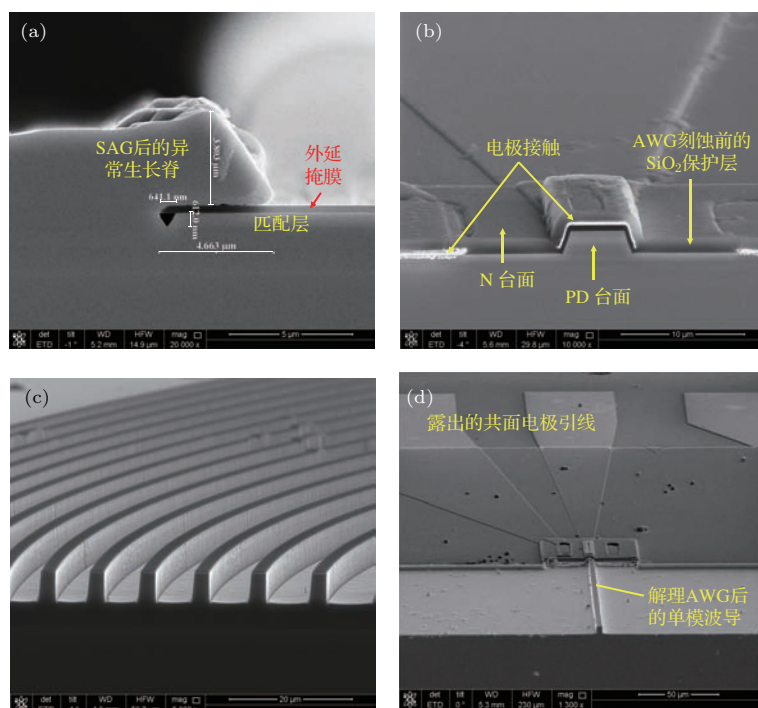


图15 器件制备过程中的扫描电子显微镜照片 (a) SAG后对接界面的异常生长脊; (b) AWG刻蚀前的完整探测器结构横截面; (c) 深脊刻蚀的AWG阵列波导; (d) 解理AWG后的波导耦合器件俯视图

Fig. 15. Scanning electronic micrographs in device fabrication: (a) Abnormal ridge at butt-joint interface after SAG; (b) cross section of fabricated PD before AWG etching; (c) deep-ridge arrayed waveguides; (d) top view of single mode waveguide coupled PD with AWG cleaved off.

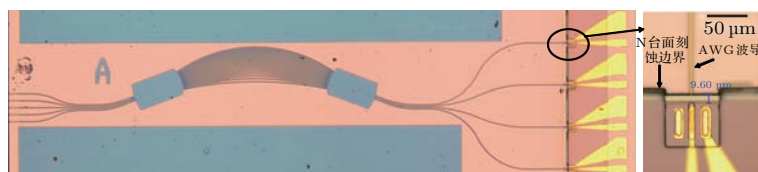


图 16 制备的集成器件显微镜俯视图

Fig. 16. Top view of fabricated monolithic chip.

表 2 集成芯片测试结果

Table 2. Measurement results of the device.

参数	信道 1	信道 2	信道 3	信道 4
中心波长/nm	1347.0	1325.0	1308.0	1286.5
总响应度/A·W ⁻¹	0.061	0.080	0.061	0.053
AWG 频谱宽度/nm	8.0	9.0	9.0	8.0
AWG 片上损耗/dB	-6.62	-5.44	-6.62	-7.23
串扰/dB	< -22			
波导耦合器件响应度/A·W ⁻¹	0.28			
探测器响应度/A·W ⁻¹	0.81			

从图 17 可看出 4 个通道的中心波长依次为 1347.0, 1325.0, 1308.0 以及 1286.5 nm. 信道间隔为 $19.25 \text{ nm} \pm 2.25 \text{ nm}$. 总响应度对应于中心波长处的光电流与 AWG 输入端光纤出光功率的比值. 信道串扰则可通过中心波长下的总响应度与其他通道的响应度差值读出, -22 dB 的低串扰值保证了各信道的独立工作. 波导耦合器件响应度 (0.28 A/W) 则为扣除 AWG 片上损耗后的器件响应度, 它不仅包括了探测器的响应度, 还包括了光纤与长度为 185 μm 的 AWG 单模输出波导端面的耦合损耗. 从图 18 可以看到, 在 5 mW 的输出功率下, 4 个通道的输出电流均稳定在 1.5 mA, 暗电流则保持在 100 nA 以下. 这说明 4 个通道的探测器有均匀的响应度与量子效率.

为了进一步估算探测器的响应度, 将光纤与波导端面的耦合损耗从 0.28 A/W 中扣除. 耦合损耗通过测试一段短距离直波导的光传输损耗获得. 实验采取“光纤-直波导-光纤”的光路设置, 测得输出光纤的光功率比输入光纤光功率降低了 9.3 dB, 因此单端面的耦合损耗为 4.65 dBm. 去掉该损耗后, 探测器的响应度为 0.81 A/W, 对应探测器的量子效率 η 为 [22]

$$\eta = R \cdot \frac{hc}{e\lambda} = 76\%. \quad (2)$$

其中, $R = 0.81 \text{ A/W}$ 为扣除各损耗后探测器的响

应度, h 为普朗克常量, c 为真空光速, e 为单位电荷量, $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 为真空波长. 可见实验所得探测器的量子效率 76% 与理论模拟值 80% 符合得很好, 说明经过二次外延后的波导结构与探测器的光耦合效率符合优化设计结果.

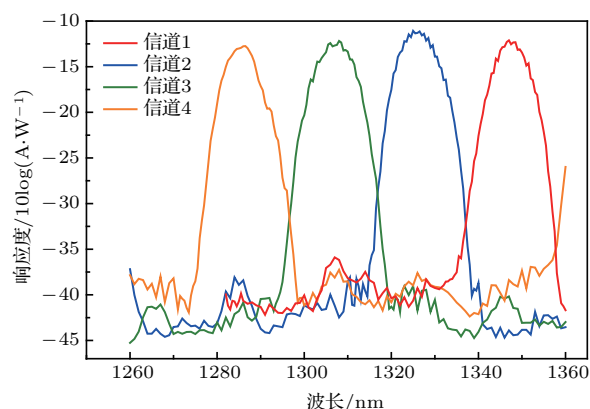


图 17 4 通道 AWG-UTC 集成器件的频谱响应度曲线

Fig. 17. Spectral photo-response of 4 channel AWG-UTC array.

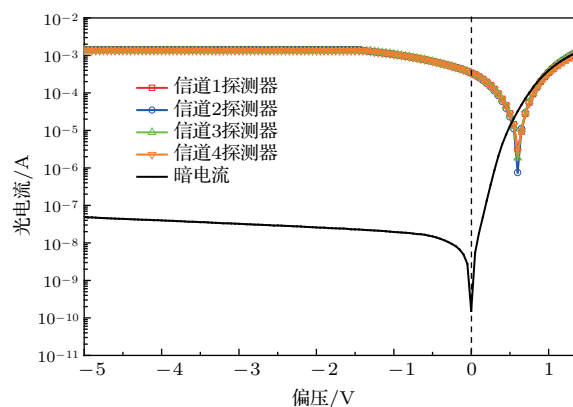


图 18 5 mW 出纤功率下波导耦合探测器的光 (暗) 电流曲线

Fig. 18. Photocurrent (and dark current) of waveguide coupled PDs under 5 mW fiber output.

4 结 论

本文研究了基于 SAG 技术下 InP 基 AWG 与倏逝波耦合型 UTC-PD 的单片集成方法. 重点讨论了 SAG 异质对接处的形貌对无源-有源光耦合

效率的影响. 通过伸长 10 μm 的光学匹配层将探测器台面与外延边界拉远, 避免了 SAG 工艺造成的异常生长脊对器件制备工艺的不良影响. 进一步地, 通过合理设计将外延生长边界、异质对接界面与 AWG 波导刻蚀边界互相对齐, 不仅保证了 80% 的高效、稳定的探测器量子效率, 还确保了 SAG 工艺与成熟的探测器工艺的兼容性. 成功制备出 O 波段 4 通道 AWG 与探测器阵列的单片集成光接收器, 其 76% 的探测器量子效率与理论模拟值符合甚佳, 证明了该耦合方案的有效性. 同时, 集成芯片展现了良好的解复用性能与低串扰特性, 在波分复用 WDM 系统中具有很好的实用潜力. 本文的研究对于有源-无源光器件的单片集成研究与制备具有很好的参考意义.

参考文献

- [1] Kish F A, Welch D, Nagarajan R, Pleumeekers J L, Lal V, Ziari M, Nilsson A, Kato M, Murthy S, Evans P, Corzine S W, Mitchell M, Samra P, Missey M, DeMars S, Schneider R P, Reffle M S, Butrie T, Rahn J T, Leeuwen M V, Stewart J W, Lambert D J H, Muthiah R C, Tsai H S, Bostak J S, Dentai A, Wu K T, Sun H, Pavinski D J, Zhang J M, Tang J, McNicol J, Kuntz M, Dominic V, Taylor B D, Salvatore R A, Fisher M, Spannagel A, Strzelecka E, Studenkov P, Raburn M, Williams W, Christini D, Thomson K J, Agashe S S, Malendevich R, Goldfarb G, Melle S, Joyner C, Kaufman M, Grubb S G 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 1470
- [2] Nagarajan R, Joyner C H, Schneider R P J, Bostak J S, Butrie T, Dentai A G, Dominic V G, Evans P W, Kato M, Kauffman M, Lambert D J H, Mathis S K, Mathur A, Miles R H, Mitchell M L, Missey M J, Murthy S, Nilsson A C, Peters F H, Pennypacker S C, Pleumeekers J L, Salvatore R A, Schlenker R K, Taylor R B, Tsai H S, Leeuwen M F V, Webjorn J, Ziari M, Perkins D, Singh J, Grubb S G, Reffle M S, Mehuys D G, Kish F A, Welch D F 2005 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **11** 50
- [3] Tolstikhin V 2013 *Proceedings of the 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim* Kyoto, Japan, June 30–July 4, 2013 TuN1-3
- [4] Wang Y, Pan J Q, Zhao L J, Zhu H L, Wang W 2010 *Chin. Phys. B* **19** 124215
- [5] Bernasconi P, Bhardwaj A, Doerr C R, Zhang L, Sauer N, Buhl L, Yang W, Neilson D T 2007 *Proceedings of the 15th Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications* Salt Lake City, Utah, United States, July 8, 2007 IMA4
- [6] Yoshikuni Y 2002 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **8** 1102
- [7] Barbarin Y, Leijtens X J M, Bente E A J M, Louzao C M, Kooiman J R, Smit M K 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 2478
- [8] Pan P, An J M, Wang Y, Zhang J S, Wang L L, Qi Y, Han Q, Hu X W 2015 *Opt. Laser Technol.* **75** 177
- [9] Ishibashi T, Kodama S, Shimizu N, Furuta T 1997 *Jpn. J. Appl. Phys.* **36** 6263
- [10] Li Z, Pan H P, Chen H, Beling A, Campbell J C 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **46** 626
- [11] Zhang R, Hraimel B, Li X, Zhang P, Zhang X P 2013 *Opt. Express* **21** 6943
- [12] Li J, Xiong B, Luo Y, Sun C Z, Wang J, Hao Z B, Han Y J, Wang L, Li H T 2016 *Opt. Express* **24** 8420
- [13] Kulkova I V, Kadkhodazadeh S, Kuznetsova N, Huck A, Semenova E S, Yvind K 2014 *J. Cryst. Growth* **402** 243
- [14] Zhang X L, Lu D, Zhang R K, Wang W, Ji C 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 064202
- [15] Smit M, Leijtens X, Ambrosius H, Bente E, Tol J V D, Smalbrugge B, Vries T D, Geluk E J, Bolk J, Veldhoven R V, Augustin L, Thijs P, D'Agostino D, Rabbani H, Lawnczuk K, Stopinski S, Tahvili S, Corradi A, Kleijn E, Dzibrou D, Felicetti M, Bitincka E, Moskalenko V, Zhao J, Santos R, Gilardi G, Yao W M, Williams K, Stabile P, Kuindersma P, Pello J, Bhat S, Jiao Y Q, Heiss D, Roelkens G, Wale M, Firth P, Soares F, Grote N, Schell M, Debregeas H, Achouche M, Gentner J L, Bakker A, Korthorst T, Gallagher D, Dabbs A, Melloni A, Morichetti F, Melati D, Wonfor A, Pentry R, Broeke R, Musk B, Robbins D 2014 *Semicond. Sci. Technol.* **29** 083001
- [16] Li M, Chen X F, Su Y K, Wang X J, Chen M H, Dai D X, Liu J G, Zhu N H 2016 *IEEE J. Quantum Electron.* **52** 0601017
- [17] Guo J C, Zuo Y H, Zhang Y, Zhang L Z, Cheng B W, Wang Q M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4524 (in Chinese) [郭剑川, 左玉华, 张云, 张岭梓, 成步文, 王启明 2010 物理学报 **59** 4524]
- [18] Zang G, Huang Y Q, Luo Y, Duan X F, Ren X M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 208502 (in Chinese) [臧鸽, 黄永清, 骆扬, 段晓峰, 任晓敏 2014 物理学报 **63** 208502]
- [19] Beling A, Campbell J C 2009 *J. Lightw. Technol.* **27** 343
- [20] Shi J W, Wu Y S, Wu C Y, Chiu P H 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1929
- [21] Pearsall T P 1982 *GaInAsP Alloy Semiconductors* (New York: Vaj-BalJou Press) pp362–363
- [22] Huang D X 2013 *Semiconductor Optoelectronics* (2nd Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p251 (in Chinese) [黄德修 2013 半导体光电子学 (第2版) (北京: 电子工业出版社) 第251页]

Butt-joint design in a uni-traveling carrier photodiode array monolithic with an arrayed waveguide grating by the selective area growth technique*

Ye Han¹⁾ Han Qin^{1)2)†} Lü Qian-Qian¹⁾ Pan Pan¹⁾ An Jun-Ming¹⁾³⁾ Wang Yu-Bing¹⁾
Liu Rong-Rui¹⁾ Hou Li-Li¹⁾

1) (State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Science, Beijing 100083, China)

2) (School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 30 March 2017; revised manuscript received 7 May 2017)

Abstract

Monolithic integration of an InP-based O-band 4-channel arrayed waveguide grating (AWG) to a uni-traveling carrier photodiode (UTC-PD) array is realized by the selective area growth (SAG) technique. The passive-active butt-joint design is introduced and experimentally proved to ensure both good compatibility between the PD fabrication process and the SAG technique, and high photodiode quantum efficiency under the complex butt-joint geometry. An extended coupling layer is adopted between the AWG output waveguides and the PD mesa. The extended coupling layer length, the regrowth boundary edge position and the AWG etching edge position relative to the heterogeneous butt-joint boundary, and the refractive indices of the PD collector and coupling layer are optically simulated and optimized by a finite-difference time-domain method.

It is found that the extended coupling layer, compared with the un-extended situation, ensures a good matched optical field from AWG to PD and could reduce nearly 30% quantum efficiency loss when connecting seamlessly to the regrown InP AWG top cladding layer. A stable high efficiency around 80% is maintained within an extended layer length from 7.5 μm to 15.0 μm . The regrowth boundary edge into the coupling region will cause a drastic efficiency oscillation up to 20% period with the increase of distance. The efficiency drop is also attributed to the light scattering at the regrowth boundary edge, caused by the optical field mismatch, while the oscillation comes from the alternative light power concentration between the coupling layer and the core layer, for the light scattering is only obvious when the light power is well concentrated in the coupling layer. The AWG etching edge position deviation from the butt-joint boundary, however, exerts little influence on the PD quantum efficiency, which is believed not to bring obvious coupling loss during device fabrication.

The higher UTC-PD collector refractive index is proved to be crucial for further better optical coupling from the coupling layer to the PD, with quantum efficiency rapidly increasing from around 0.1 to 0.8 when the index is increased from 3.20 to 3.42. By comparison, the efficiency is little affected by the coupling layer refractive index from 3.34 to 3.42.

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA016902), the National Key Research and Development Plan of China (Grant No. 2016YFB0402404), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61635010, 61674136, 61435002).

† Corresponding author. E-mail: hanqin@semi.ac.cn

All things considered, we select a 10 μm extended coupling layer, the refractive indices of both PD collector and the coupling layer to be 3.42, and align both the regrowth boundary edge and the AWG etching edge to the heterogeneous butt-joint boundary, and a PD quantum efficiency of 80% is expected.

Owing to the extended coupling layer at the butt-joint, the SAG technique facilitates the PD fabrication process. The overgrown AWG top cladding layer ridge stretches out 4.67 μm toward the PD, but not over the mesa yet, hence has little influence on the PD fabrication accuracy. The monolithic chip presents a uniform photodiode quantum efficiency of 76%, which accords well with theoretical value and confirms the butt-joint design. Central wavelengths for the four channels are 1347.0 nm, 1325.0 nm, 1308.0 nm, and 1286.5 nm, respectively. The low crosstalk level (below -22 dB) also indicates a good de-multiplexer performance.

Keywords: monolithic integration, arrayed waveguide grating, uni-traveling carrier photodiode, selective area growth

PACS: 85.60.Dw, 42.82.Bq, 42.79.Sz

DOI: [10.7498/aps.66.158502](https://doi.org/10.7498/aps.66.158502)