光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023102402

基于DBR增强的850 nm GaAs/AlGaAs单行载流子光电探测器

王　健[1*]，窦志鹏[1]，李光昊[2]，黄晓峰[2]，于　千[1]，郝智彪[1]，熊　兵[1]，孙长征[1]，韩彦军[1]，汪　莱[1]，李洪涛[1]，甘　霖[1]，罗　毅[1]

（1. 清华大学 北京国家信息科学与技术研究中心，北京 100084；
2. 重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 高速850 nm GaAs/AlGaAs面入射型单行载流子光电探测器(PD)是短距离光链路中的重要器件，面临着带宽和响应度之间的相互矛盾。报道了一种基于分布布拉格反射器(DBR)增强的GaAs/AlGaAs单行载流子光电探测器(UTC-PD)。DBR由20个周期的高/低Al组分的$Al_xGa_{1-x}As$三元合金组成，可以在830～870 nm范围内形成大于0.9的反射。在AlGaAs DBR的增强下，将GaAs吸收层所需的厚度降低到1 040 nm，兼顾PD对光的吸收率和光生载流子的渡越时间。采用双台面、聚合物平面化、共面波导电极结构制作了UTC-PD器件。该器件在850 nm波长、－2 V偏压下具有19.26 GHz的－3 dB带宽和0.492 6 A/W的响应度。

关键词： GaAs；AlGaAs；光电探测器；单行载流子；分布布拉格反射器；850 nm波长

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0025－04

DBR-Enhanced 850 nm GaAs/AlGaAs Uni-Traveling-Carrier Photodiode

WANG Jian[1]，DOU Zhipeng[1]，LI Guanghao[2]，HUANG Xiaofeng[2]，YU Qian[1]，HAO Zhibiao[1]，XIONG Bing[1]，SUN Changzheng[1]，HAN Yanjun[1]，WANG Lai[1]，LI Hongtao[1]，GAN Lin[1]，LUO Yi[1]

（1. Beijing National Research Center of Information Science and Technol.，Tsinghua University，Beijing 100084，CHN；
2. Chongqing Optoelectronics Research Institute，Chongqing 400060，CHN）

Abstract： GaAs/AlGaAs surface-illuminated uni-traveling carrier (UTC) photodiodes (PDs) are critical devices for short-range optical links. However, a conflict exists between bandwidth and responsiveness. We report a GaAs/AlGaAs UTC-PD enhanced by a distributed Bragg reflector (DBR) that consists of 20 cycles of high/low Al component $Al_xGa_{1-x}As$ and has a reflectance >0.9 in the wavelength range of 830～870 nm. The thickness of the GaAs absorption layer is reduced to 1 040 nm, which compromises the light absorption of the PD and transit time of photogenerated electrons. The UTC-PD device is fabricated with a double-mesas structure, polymer planarization, and a coplanar waveguide electrode. The device has a －3 dB bandwidth of 19.26 GHz, a responsivity of 0.492 6 A/W at a wavelength of 850 nm, and a bias of －2 V.

Key words： GaAs；AlGaAs；photodiode；UTC；DBR；850 nm wavelength

收稿日期：2023－10－24.
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB2803000)；国家自然科学基金项目(62235005，62127814，62225405，61975093，61927811，61991443，61974080)；华为-清华大学信息光电子与光学合作项目(20212001822).
*通信作者：王　健

0 引言

高速 850 nm GaAs/AlGaAs 面入射型光电探测器(PD)作为短距离光链路中的接收器,在高性能计算(如数据中心)等场景具有重要应用[1-2]。为满足高性能计算系统对短距离光链路不断增长的需求,迫切需要大带宽、高响应度、低驱动电压的光电探测器。目前,人们广泛采用 p-i-n GaAs/AlGaAs PD 作为短距离光链路中的接收器,为实现高速工作,通常需要足够大的偏置电压来加速载流子输运。单行载流子光电探测器(UTC-PD),兼有大带宽、高灵敏度、低驱动电压的潜在优势[3-5],成为 850 nm PD 的重要发展方向[6-8]。然而,在有源区吸收材料一定的情况下,面入射型 PD 普遍面临着带宽和响应度之间的相互矛盾——为提高带宽,希望降低光生载流子渡越时间,需要采用较薄的光吸收有源层;为提高响应度,希望增加对光的吸收,需要采用较厚的光吸收有源层。

本论文报告了一种基于 AlGaAs 分布布拉格反射器(DBR)增强的 GaAs/AlGaAs UTC-PD。DBR 由 20 个周期的高/低 Al 组分的 $Al_xGa_{1-x}As$ 三元合金组成,可以在 830～870 nm 范围内形成大于 0.9 的反射率,可大大降低 GaAs 吸收层所需的厚度,从而兼顾 PD 对光的吸收率和光生电子的渡越时间。本文采用双台面、聚合物平面化、共面波导电极结构制作了UTC-PD器件,该器件在 850 nm波长、−2.5 V 偏压下具有 19.26 GHz 的−3 dB 带宽和 0.492 6 A/W 的响应度。

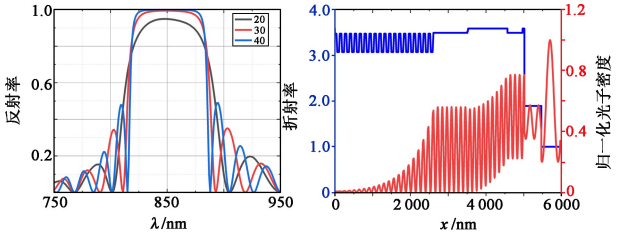
1 器件结构、仿真和制作

本文设计的光电探测器的外延结构如表 1 所示,样品采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)系统在半绝缘 GaAs 衬底上生长。首先在非故意掺杂 200 nm 厚 GaAs 缓冲层上,外延生长 20 个周期的高低折射率非故意掺杂 AlGaAs 对作为 DBR 反射镜,每个 AlGaAs 对由高折射率的 $Al_{0.18}Ga_{0.82}As$、$Al_{0.18}Ga_{0.82}As$→$Al_{0.83}Ga_{0.17}As$ 过渡层、低折射率的 $Al_{0.83}Ga_{0.17}As$ 和 $Al_{0.83}Ga_{0.17}As$→$Al_{0.18}Ga_{0.82}As$ 过渡层组成,各层的厚度分别为 42.43,20,47.99 和 20 nm,形成对 850 nm 波段的高反射。接着,外延生长 600 nm 厚的 n 型 $Al_{0.15}Ga_{0.8}$ 作为底部接触层和 300 nm 厚的非故意掺杂 $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 作为收集层,生长非故意掺杂的 10 nm 厚的 $Al_{0.10}Ga_{0.90}As$ 和 10 nm 厚的 $Al_{0.05}Ga_{0.95}As$ 作为渐变层。然后,生长 1 040 nm 厚的 GaAs 作为吸收层,该吸收层由 910 nm 厚的非故意掺杂 GaAs 和 4 个 32.5 nm 厚的掺杂浓度阶跃变化的 p 型 GaAs 组成,前者作为耗尽吸收层,后者的掺杂浓度分别为 2×10^{17},5×10^{17},1×10^{18} 和 2×10^{18} cm^{-3},以产生有助于电子传输的准电场。之后,生长 400 nm 厚的 p 型 $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 作为电子阻挡层。最后,生长 50 nm 厚重掺杂 p 型 GaAs 层作为顶部接触层。

表 1 设计的 AlGaAs DBR 增强的 GaAs/AlGaAs UTC-PD 的外延结构

层号	材料	掺杂剂	掺杂类型	掺杂浓度/cm^{-3}	厚度/nm	作用
17	GaAs	C	p^+	1×10^{19}	50	p 型接触层
16	$Al_{0.15}Ga_{0.85}As$	C	p^+	2×10^{18}	400	电子势垒
15	GaAs	C	p^+	2×10^{18}	32.5	未耗尽吸收层,阶梯式掺杂产生有助于电子传输的准电场
14	GaAs	C	p^+	1×10^{18}	32.5	
13	GaAs	C	p^+	5×10^{17}	32.5	
12	GaAs	C	p^+	2×10^{17}	32.5	
11	GaAs		非掺	$<1\times10^{15}$	910	耗尽吸收层
10	$Al_{0.05}Ga_{0.95}As$		非掺	$<1\times10^{15}$	10	渐变层
9	$Al_{0.10}Ga_{0.90}As$		非掺	$<1\times10^{15}$	10	渐变层
8	$Al_{0.15}Ga_{0.85}As$		非掺	$<1\times10^{15}$	300	收集层
7	$Al_{0.15}Ga_{0.85}As$	Si	n^+	1×10^{18}	100	n 型接触层
6	$Al_{0.15}Ga_{0.85}As$	Si	n^+	3×10^{18}	500	n 型接触层
5	$Al_{0.83}Ga_{0.17}As$→$Al_{0.18}Ga_{0.82}As$		非掺	$<1\times10^{15}$	20	850 nm DBR 对,重复周期数 20
4	$Al_{0.83}Ga_{0.17}As$		非掺	$<1\times10^{15}$	47.99	
3	$Al_{0.18}Ga_{0.82}As$→$Al_{0.83}Ga_{0.17}As$		非掺	$<1\times10^{15}$	20	
2	$Al_{0.18}Ga_{0.82}As$		非掺	$<1\times10^{15}$	42.43	
1	GaAs		非掺	$<1\times10^{15}$	200	缓冲层
0	GaAs		半绝缘			衬底

基于薄膜矩阵原理，首先模拟仿真计算了垂直入射条件下，所采用的 AlGaAs DBR 在 850 nm 附近波段的反射情况，结果如图 1(a)所示，由图 1(a)可见，吸收率峰位于 850 nm 处，反射率峰值随着高低折射率 AlGaAs 对的周期数的增加而增加。为了简化外延生长，我们采用周期数为 20 的 AlGaAs 对，反射率达到 0.948 6。偏离 850 nm 后，反射率略有下降，即便如此，在 830 和 870 nm 波长下的反射率也高达 0.906 5 和 0.915 0。然后模拟仿真了 DBR GaAs/AlGaAs PD 对光的吸收情况。仿真中，在 p-GaAs 顶部设置一个折射率为 $(n\text{-GaAs})^{0.5}$、厚度为四分之三波长的薄膜作为抗反射层。图 1(b)显示了波长为 850 nm 的入射光在 PD 深度方向的光子密度的分布情况，为便于分析，图中也画出了复折射率实部在 PD 深度方向的分布。可以看到，在 DBR 的反射下，光子密度的分布呈现出明显的驻波形态。光子密度分布的包络在两个区域发生明显的衰减，第一处衰减发生在 GaAs 有源层，由 GaAs 有源层对光的强烈吸收引起；第二处衰减发生在 DBR 区，尽管所选用的 AlGaAs 对 850 nm 光基本没有吸收，但高/低折射率的 AlGaAs DBR 强烈反射入射光，到达 GaAs 衬底的光基本可以忽略不计，从而可以大大降低所需要的 GaAs 的厚度。



(a)　　(b)

图 1　AlGaAs DBR 反射增强吸收的仿真计算结果。(a) AlGaAs DBR 的反射曲线；(b) 波长为 850 nm 的光沿 AlGaAs DBR 增强的 GaAs/AlGaAs UTC-PD 外延生长方向的场分布

将样品加工成双台面结构。首先采用光刻、电子束蒸发沉积 Ti/Pt/Au 叠层、丙酮超声剥离工艺制作 P 电极。然后采用光刻、H_2SO_4 ∶ H_2O_2 ∶ H_2O 混合溶液腐蚀 P 台面，停止在 N 型重掺杂的 $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$。P 台面形成后，紧接着采用等离子体化学气相沉积(PECVD) SiN_x 薄膜钝化侧壁，SiN_x 薄膜厚度约为 3λ/8，即 160 nm。之后再采用光刻、H_2SO_4 ∶ H_2O_2 ∶ H_2O 混合溶液腐蚀 N 台面，停止在非掺杂 AlGaAs DBR。N 台面形成后，紧接着采用 PECVD SiN_x 薄膜钝化侧壁，SiN_x 薄膜厚度也约为 3λ/8，这样 PD 的光入射面就有了厚度为 3λ/4 的 SiN_x 增透膜。然后旋涂光敏聚酰亚胺(PI)实现介质层平面化，调整旋涂参数使得 PI 的厚度略高于双台面的深度。光刻 PI，露出电极孔位置后对 PI 进行玻璃化。光刻，反应离子刻蚀(RIE)加氢氟酸湿法腐蚀去除露出来的 SiN_x 形成电极孔。采用电子束蒸发 Cr/Au 作为种子层，光刻露出 P，N 共面波导(CPW)电极图案，电镀厚度约为 3 μm 的 Au。然后光刻，湿法腐蚀去除 CPW 电极之间的 Cr/Au 种子层。图 2 是制作完 CPW 电极的单个 PD 的光学显微镜俯视图。

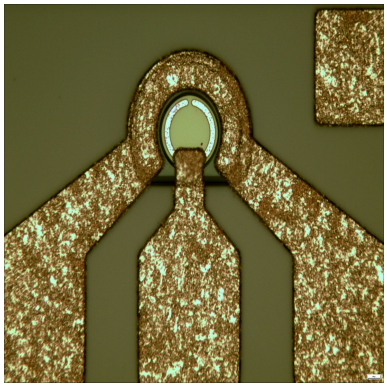


图 2　AlGaAs DBR 增强的 GaAs/AlGaAs UTC-PD 的光学显微镜照片

2　结果

我们研究了器件在室温下的响应度和带宽特性。光源由波长为 850 nm 的 DFB 激光器产生，并由 MZ 调制器调制。采用透镜光纤将光束会聚至 PD 光敏面上。直流反向偏压通过外部偏置三通(bias tee)提供，光电流由射频 GSG 探针收集。采用型号为 ZNA67 的矢量网络分析仪和 GOCA-67 的光电底座，仔细校准了电缆和 GSG 探针的随频率变化的损耗值，同时从测量数据中减去供应商提供的 MZM 损耗。在 −2 V 偏置下，直径 15 μm 器件在 850 nm 处的典型响应度约为 0.492 6 A/W，在 0～4 V 的反向电压范围内，响应度对反向偏置电压不敏感。图 3 显示了器件的小信号频率响应测量结果，对应的 −3 dB 带宽为 19.26 GHz。

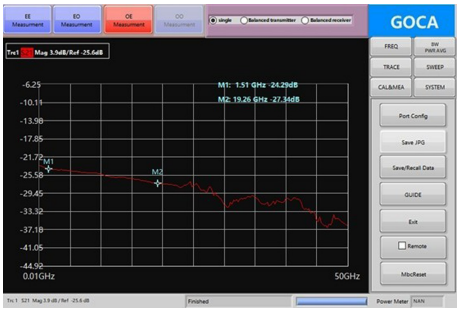


图 3 AlGaAs DBR 增强的 GaAs/AlGaAs UTC-PD 的小信号频率响应

3 总结

本文报告了一种 DBR 增强的 GaAs/AlGaAs 的 UTC-PD。DBR 由 20 个周期的高/低 Al 组分的 $Al_xGa_{1-x}As$ 三元合金组成，可以在 830～870 nm 范围内形成大于 0.9 的反射率，从而可兼顾 PD 对光的吸收率和光生电子的渡越时间。采用双台面、聚合物平面化、共面波导电极结构制作了 UTC-PD 器件，该器件在 850 nm 波长、－2.5 V 偏压下具有 19.26 GHz 的－3 dB 带宽和 0.492 6 A/W 的响应度。

参考文献：

[1] Dupuis N, Kuchta D M, Doany F E, et al. Exploring the limits of high-speed receivers for multimode VCSEL-based optical links[C]// OFC 2014, San Francisco, 2014: 1-3.

[2] Taubenblatt M A. Optical interconnects for high-performance computing[J]. J. Lightwave Technol., 2012, 30(4): 448-457.

[3] Umezawa T, Akahane K, Yamamoto N, et al. Zero-bias operational ultra-broadband UTC-PD above 110 GHz for high symbol rate PD-array in high-density photonic integration [C]// 2015 Optical Fiber Commun. Conf. and Exhibition (OFC), 2015: 1-3.

[4] Wun J M, Chao R L, Wang Y W, et al. Type-Ⅱ $GaAs_{0.5}Sb_{0.5}$/InP uni-traveling carrier photodiodes with sub-terahertz bandwidth and high-power performance under zero-bias operation[J]. J. Lightwave Technol., 2017, 35(4): 711-716.

[5] Yu F, Sun K, Yu Q, et al, High-speed evanescently-coupled waveguide Type-Ⅱ MUTC photodiodes for zero-bias operation [J]. J. Lightwave Technol., 2020, 38(24): 6827-6832.

[6] Kuo F M, Hsu T C, Shi J W. A GaAs/AlGaAs based uni-traveling-carrier photodiode for 10 Gbit/sec optical interconnect at 850 nm wavelength with zero electrical power consumption [C]// 2009 Conf. on Optical Fiber Communication, San Diego, 2009: 1-3.

[7] Umezawa T, Akahane K, Yamamoto N, et al. Ultra-broadband UTC-PD beyond 110 GHz at 0 V for future photonic integration[C]// Microwave Photonics (MWP) and the 2014 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP), 2014: 450-453.

[8] Xie Z, Zhou Z, Li L, et al. High-speed 850 nm photodetector for zero-bias operation[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2022, 28(2): 1-7.

作者简介：

王 健(1977－)，男，浙江省温岭市人，博士，副研究员，从事高速半导体激光器和探测器研究。