

DOI:10.16136/j.joel.2023.05.0297

用于下一代数据中心的改进型单行载流子光探测器的研究

刘浩冉, 袁纬方, 廖卓冬, 刘凯, 段晓峰*, 黄永清

(北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 本文研究并提出一种具有电场增强的混合吸收层结构的单行载流子光探测器 (electric-enhanced modified uni-traveling carrier photodetector, EE-MUTC-PD)。该结构通过吸收区渐变掺杂增强了光探测器吸收区电场, 将吸收区分为部分耗尽和耗尽两个部分, 使得光生电子漂移通过吸收区的同时光生空穴会在弛豫时间内被收集, 有效解决了单行载流子光探测器 (uni-traveling carrier photodetector, UTC-PD) 在低光功率注入下不能保持较高带宽的问题, 同时实现了高响应度, 可用于下一代 800 Gb/s 光通信系统中。

关键词: 光通信; 光探测器; 电场; 频率响应; 量子效率

中图分类号: E963 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)05-0457-09

Study of modified uni-traveling carrier photodetector used in next generation optical communication system

LIU Haoran, YUAN Weifang, LIAO Zhuodong, LIU Kai, DUAN Xiaofeng*, HUANG Yongqing

(State Key Laboratory of Information Photonics & Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: This paper studies and proposes a electric-enhanced modified uni-traveling carrier photodetector (EE-MUTC-PD) with a hybrid absorption layer. This structure introduces graded doping to enhance the electric field in the absorption region of the photodetector, and divides the absorption into two parts, partially depleted and depleted, so that the photogenerated electrons drift through the absorption region and the photogenerated holes will be collected during the relaxation time, which effectively solves the problem that the uni-traveling carrier photodetector (UTC-PD) cannot maintain a high bandwidth under low optical power injection, while achieving high responsivity. This photodetector can be used in the next generation 800 Gb/s optical communication system.

Key words: optical communication; photodetector; electric field; frequency response; quantum efficiency

0 引言

随着云服务^[1]的迅速发展, 数据中心互连对流量的需求正在急剧增加, 同时对数据的传输速率也正面临着从 4×25 Gb/s、 4×100 Gb/s 向 4×200 Gb/s 的提升^[2]。在下一代 800 G 的以太网 (800GE) 标准^[3,4]中, 系统采用的是 4×200 Gb/s 光模块^[5], 要求每通道^[6]光探测器的带宽达到

56 GHz 以上, 响应度达到 0.5 A/W。同时, 光探测器需要具有大的响应度^[7], 为后续的信号处理提供大的信号电流。这就需要优化光探测器结构来适应下一代数据中心互连光模块的需求。传统的单行载流子光探测器 (uni-traveling carrier photodetector, UTC-PD)^[8]为了减少空穴渡越时间给光探测器带宽带来的影响, 将高速的电子作为有源载流子, 极大地减小载流子在光探测器中的渡

* E-mail: xfduan@bupt.edu.cn

收稿日期: 2022-04-24 修订日期: 2022-06-27

基金项目: 国家重点研发课题 (2018YFB2200803) 和国家创新研究群体科学基金 (62021005) 资助项目

越时间,并且有效抑制空间电荷效应,使得 UTC-PD^[9]具有高速、大功率的优异性能。WANG 等^[10]设计了一种电荷补偿的改进型单行载流子光探测器(modified uni-traveling carrier photodetector, MUTC-PD),在器件直径为 20 μm 时,光探测器带宽达到了 30 GHz,响应度为 0.75 A/W。LI 等^[11]设计了一种具有崖层的改进型 UTC-PD,在器件直径为 34 μm 时,光探测器带宽达到了 24 GHz,响应度为 0.69 A/W。SHI 等^[12]设计的一种背靠背型 UTC-PD,在器件直径为 24 μm 时,光探测器的带宽达到了 28.3 GHz,响应度达到了 0.86 A/W。为了达到高响应度,UTC-PD 需要较厚的吸收层,这就使得光探测器的响应速度受到了极大的限制。

为了在光探测器的高速响应和高响应度之间达到一个比较好的平衡,ACHOUICHE 等^[13]设计了一种倏逝波耦合波导 UTC-PD,在器件有源区面积为 125 μm^2 时,光探测器的带宽达到了 50 GHz,响应度达到了 0.76 A/W。WANG 等^[14]设计了一种倒置的倏逝波耦合波导 MUTC-PD,在器件有源区面积为 35 μm^2 时,光探测器的带宽达到了 71.9 GHz,响应度为 0.59 A/W。

本文设计了一种具有电场增强的混合吸收层结构的单行载流子光探测器(electric-enhanced modified uni-traveling carrier photodetector, EE-MUTC-PD),该结构在具有高带宽的同时保持了较高的响应度,并且通过商业仿真软件 Silvaco TCAD 进行建模和仿真^[15]。本文首先详细介绍器件的结构和在具有高带宽的同时保持高响应度的

原因,然后详细分析了器件吸收层的电场和能带,以及此时吸收层载流子传输的状态。最后,研究结果表明本文提出的光探测器结构能在低光功率注入下获得较高的响应速度同时保持高响应度。

1 器件设计和优化

为了使得光探测器具有高响应度,光探测器需要一个较厚的吸收层,此时光探测器的带宽主要受到吸收层中载流子的运动速度的影响。图 1 分别是 UTC-PD、漂移增强型光探测器(dual-depletion region photodetector, DDR-PD)和 EE-MUTC-PD 吸收区的能带图,表 1 和图 2 是 EE-MUTC-PD 的外延层参数和结构。 W_A 、 W_U 、 W_G 、 W_D 、 W_P 和 W_N 分别是重掺杂吸收层厚度、本征吸收层厚度、渐变掺杂吸收层厚度、耗尽层厚度、部分耗尽层厚度和未耗尽层厚度。在 UTC-PD 中,吸收区是由高掺的 InGaAs 材料组成,这部分区域是非耗尽区。如图 1(a)所示,吸收层能带是平直的,此时吸收层中的空穴在弛豫时间内恢复到稳态,光生电子向着收集区扩散,因此电子运动速度主要决定器件的带宽。在 DDR-PD 中,吸收区是由本征的 InGaAs 材料组成,这部分区域是完全耗尽的。如图 1(b)所示,吸收层能带以一定斜率倾斜,此时光生空穴和光生电子在吸收区高电场下分别向 P 接触层和 N 接触层漂移,光生电子的漂移速度大于光生空穴的漂移速度,因此器件带宽主要受到光生空穴运动速度的影响。在 EE-MUTC-PD 中,吸收层由渐变掺杂和本征的 InGaAs 材料共同构成,在这个条件下,吸收区域主要由两个部分构成。如图 1(c)所示,一部分是部分耗尽区域,这个区

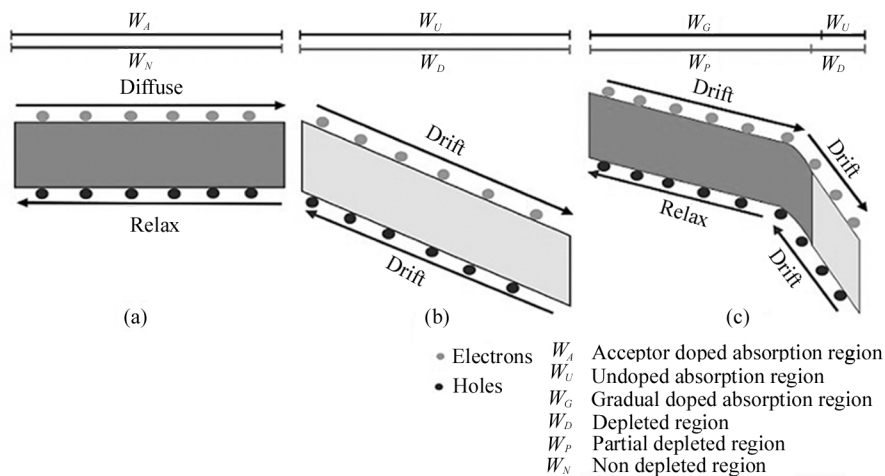


图 1 光探测器吸收区能带图:(a) UTC-PD; (b) DDR-PD; (c) EE-MUTC-PD

Fig. 1 The energy band diagram of absorption region in photodetector:

(a) UTC-PD; (b) DDR-PD; (c) EE-MUTC-PD

域能带先是以一定斜率倾斜,之后以可变斜率弯曲;另一部分是完全耗尽区域,在这个区域能带是以一定斜率倾斜。在完全耗尽区域,光生载流子的运动情况和 DDR-PD 相同。在部分耗尽区域,因为部分耗尽区域是 P 型重掺杂,空穴是多子,空穴在弛豫时

间内恢复到稳态,光生电子在内建电场的作用下向 N 接触层漂移。虽然 EE-MUTC-PD 部分耗尽区域较宽,但是光生电子在这个区域是以漂移速度通过的,所以能极大地提高 EE-MUTC-PD 的载流子渡越带宽。

表 1 EE-MUTC-PD 的外延层参数

Tab. 1 Epitaxial layer parameters of EE-MUTC-PD

Layer	Material	Thickness /nm	Bandgap /eV	Doping /cm ⁻³
P contact	InGaAs	50	0.73	P 2×10^{19}
Electron barrier	InGaAsP	20	0.95	P 1×10^{19}
P absorption	InGaAs	540	0.73	Gradual doping ($5 \times 10^{18} - 1 \times 10^{15}$)
U absorption	InGaAs	120	0.73	Undoped
Spacer	InGaAsP	13	0.8	N 1×10^{16}
Cliff	InP	10	1.35	N 1.5×10^{18}
Collection	InP	860	1.35	N 1×10^{15}
N contact	InP	300	1.35	N 1×10^{19}

在本文中,所有光探测器有源区直径为 16 μm ,反向偏压为 4 V,具有 P 型全覆盖接触电极,入射光的波长为 1310 nm,入射光功率为 1 mW,光从器件 N 侧垂直入射,本文所有的仿真结构由 TCAD 仿真软件得到。仿真的器件是用于长波长的 InP 基光探测器,所用的 InGaAs 和 InP 材料的光学和电学参数以及折射率和迁移率在表 2 中列出^[16,17]。

1.1 吸收层优化

EE-MUTC-PD 的器件直径为 16 μm ,外延层结构如图 2 所示。本文设计了具有相同吸收层厚度的

UTC-PD 和 MUTC-PD 与 EE-MUTC-PD 进行对比,UTC-PD 和 MUTC-PD 的外延层参数如表 3 和表 4 所示。UTC-PD 的吸收层结构完全由高掺杂的 InGaAs 材料组成,掺杂浓度是 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$,厚度为 660 nm。MUTC-PD 的吸收层结构由高掺杂和本征的 InGaAs 共同构成,高掺杂部分掺杂浓度是 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$,厚度为 540 nm,本征层厚度 120 nm。EE-MUTC-PD 的吸收层结构由 540 nm 厚的渐变掺杂吸收层和 120 nm 厚的本征层组成。3 种光探测器的吸收层厚度均相同。

表 2 材料的仿真参数

Tab. 2 Material parameters in simulation

Parameter	InP	InGaAs
Electron mobility	5400 cm ² /(V·s)	12000 cm ² /(V·s)
Hole mobility	200 cm ² /(V·s)	300 cm ² /(V·s)
Conduction band density of states	$5.7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	$2.1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
Valence band density of states	$1.1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	$7.7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Electron saturation velocity	$2.6 \times 10^7 \text{cm/s}$	$2.5 \times 10^7 \text{cm/s}$
Hole saturation velocity	$5 \times 10^6 \text{cm/s}$	$5 \times 10^6 \text{cm/s}$
Electron and hole life time	$2 \times 10^{-9} \text{s}$	$1 \times 10^{-7} \text{s}$
Electron Auger coefficient	$3.7 \times 10^{-31} \text{cm}^6/\text{s}$	$3.2 \times 10^{-28} \text{cm}^6/\text{s}$
Hole Auger coefficient	$8.7 \times 10^{-30} \text{cm}^6/\text{s}$	$3.2 \times 10^{-28} \text{cm}^6/\text{s}$
Real refractive index (1310 nm)	3.2	3.51
Imaginary refractive index (1310 nm)	0	0.106

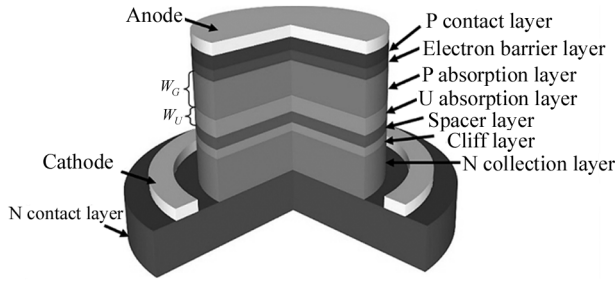
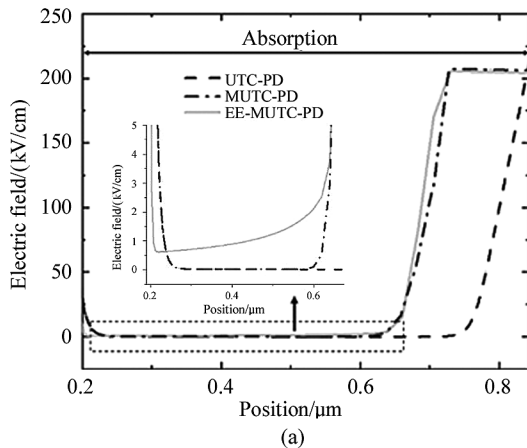


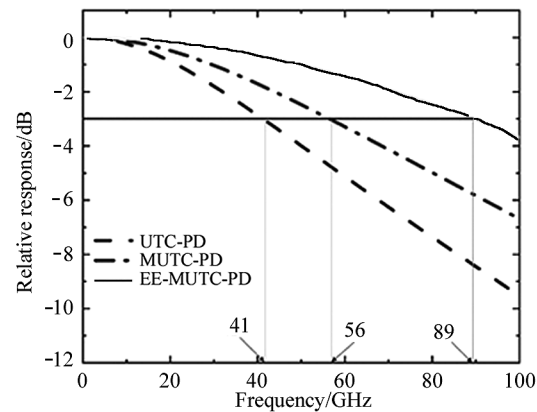
图2 EE-MUTC-PD的3D视图

Fig. 2 3D view of the EE-MUTC-PD

3种光探测器的吸收层电场如图3(a)所示, UTC-PD的吸收层是非耗尽的,同时没有内建电场,这个区域的空穴在弛豫时间内恢复到稳态,光生电子因为没有内建电场,以扩散速度通过吸收区,电子扩散速度相对较慢,极大地限制了光探测器的带宽。MUTC-PD的吸收层由两部分组成,一部分是非耗尽区,一部分是耗尽区,在耗尽区有很高的电场,同时也提高了非耗尽区与耗尽区相邻区域的电场。光生电子在非耗尽区中,由于没有电场,光生电子向耗尽区扩散。在耗尽区中,光生电子因为电场的影响向收集区漂移,提高了器件的总带宽。EE-MUTC-PD吸收层由渐变掺杂层和本征层共同组成,整个吸收层分为部分耗尽区和耗尽区两个区域。在部分耗尽区内,引入了电场,空穴在弛豫时间内恢复到稳态,电子以漂移速度通过。在耗尽区,耗尽区较薄,电子和空穴以漂移速度通过。如图3(b)所示,与UTC-PD和MUTC-PD相比,因为EE-MUTC-PD在吸收层的载流子渡越效率更高,所以器件的载流子渡越带宽是最大的。



(a)



(b)

图3 3种光探测器的吸收区电场和载流子渡越带宽:(a)吸收区电场;(b)载流子渡越带宽

Fig. 3 Electric field in the absorption region and carrier transmit time limited bandwidth of three kinds of photodetectors:

(a) Electric field in the absorption region; (b) Carrier transmit time limited bandwidth

图4(a)是3种光探测器的能带图,研究表明当引入渐变掺杂后,吸收区能带以一定斜率倾斜。图4(b)是3种光探测器的频率响应对比,由图可得,EE-MUTC-PD的带宽最大,达到了60 GHz。

表3 UTC-PD的外延层参数

Tab. 3 Epitaxial layer parameters of UTC-PD

Layer	Material	Thickness /nm	Bandgap /eV	Doping /cm ⁻³
P contact	InGaAs	50	0.73	P 2×10 ¹⁹
Electron barrier	InGaAsP	20	0.95	P 1×10 ¹⁹
P absorption	InGaAs	540	0.73	P 2×10 ¹⁷
U absorption	InGaAs	120	0.73	Undoped
Spacer	InGaAsP	13	0.8	N 1×10 ¹⁶
Cliff	InP	10	1.35	N 1.5×10 ¹⁸
Collection	InP	860	1.35	N 1×10 ¹⁵
N contact	InP	300	1.35	N 1×10 ¹⁹

表4 MUTC-PD的外延层参数

Tab. 4 Epitaxial layer parameters of MUTC-PD

Layer	Material	Thickness /nm	Bandgap /eV	Doping /cm ⁻³
P contact	InGaAs	50	0.73	P 2×10 ¹⁹
Electron barrier	InGaAsP	20	0.95	P 1×10 ¹⁹
P absorption	InGaAs	660	0.73	P 2×10 ¹⁷
Spacer	InGaAsP	13	0.8	N 1×10 ¹⁶
Cliff	InP	10	1.35	N 1.5×10 ¹⁸
Collection	InP	860	1.35	N 1×10 ¹⁵
N contact	InP	300	1.35	N 1×10 ¹⁹

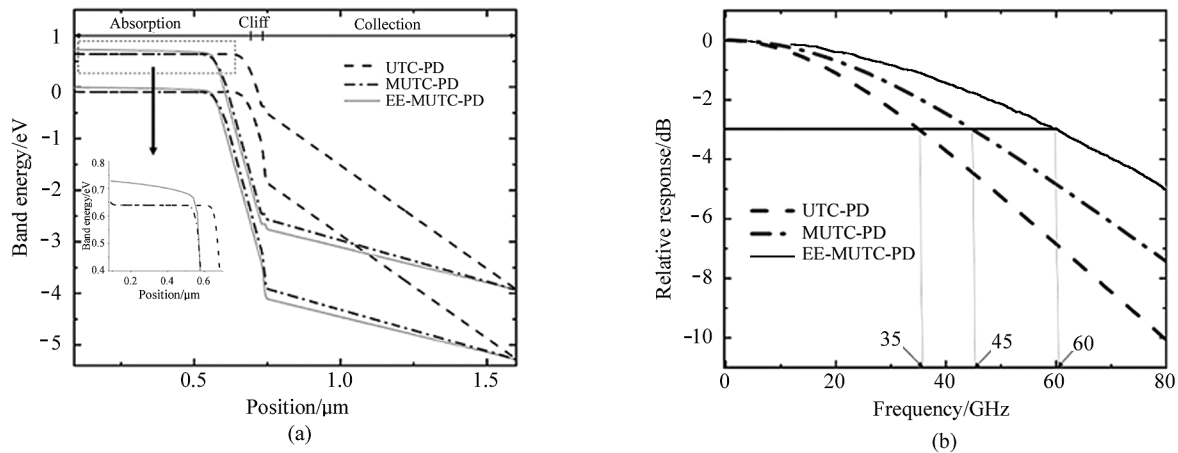


图 4 3 种光探测器的能带和频率响应对比:(a) 能带; (b) 频率响应

Fig. 4 Comparison of energy band and frequency response of three kinds of photodetectors: (a) Energy band; (b) Frequency response

1.2 崖层优化

在 EE-MUTC-PD 中,崖层位于耗尽吸收区和收集层之间,耗尽吸收区会有较高的电场,如图 5 所示,崖层电场和耗尽吸收区的电场保持一致,当崖层的厚度发生变化时,会调节器件收集层的电场,进而影响电子在收集层中的运动速度,所以合适的崖层

厚度会使得电子在收集层以过冲速度渡越。

优化器件崖层厚度时,为了排除器件的 RC 时间影响的带宽对总带宽的影响,图 6(a)提取了光探测器的结电容,随着崖层厚度的变化,器件的结电容变化较小,可以得出此时器件的带宽是受到载流子渡越时间的影响。图 6(b)是崖层厚度对光探测器的总带宽和载流子渡越带宽的影响,当崖层厚度是 10 nm 时,此时器件的载流子渡越带宽达到最大。当崖层厚度大于 10 nm 时,器件收集层电场开始减小,电子在收集层中的运动速度降低,所以器件的载流子渡越带宽减小,导致总带宽减小。

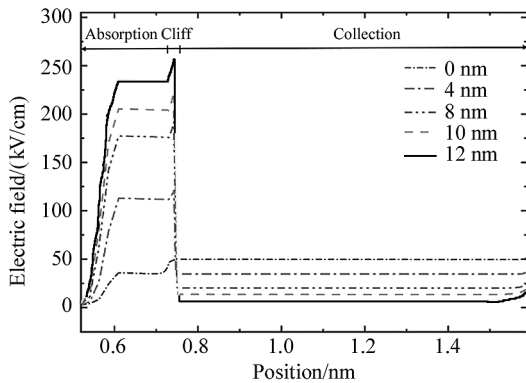


图 5 崖层厚度对光探测器电场的影响

Fig. 5 The influence of cliff layer thickness on electric field of photodetector

1.3 收集层优化

改变收集层厚度有利于平衡光探测器载流子渡越带宽和 RC 时间常数带宽,图 7(a)和图 7(b)是收集层厚度对光探测器带宽和结电容的影响。当收集层厚度小于 0.86 μm 时,随着收集层厚度的增加,光探测器的带宽逐渐增加,结电容逐渐减小。当收集层比较薄时,因为此时器件的耗尽区较窄,所以器件

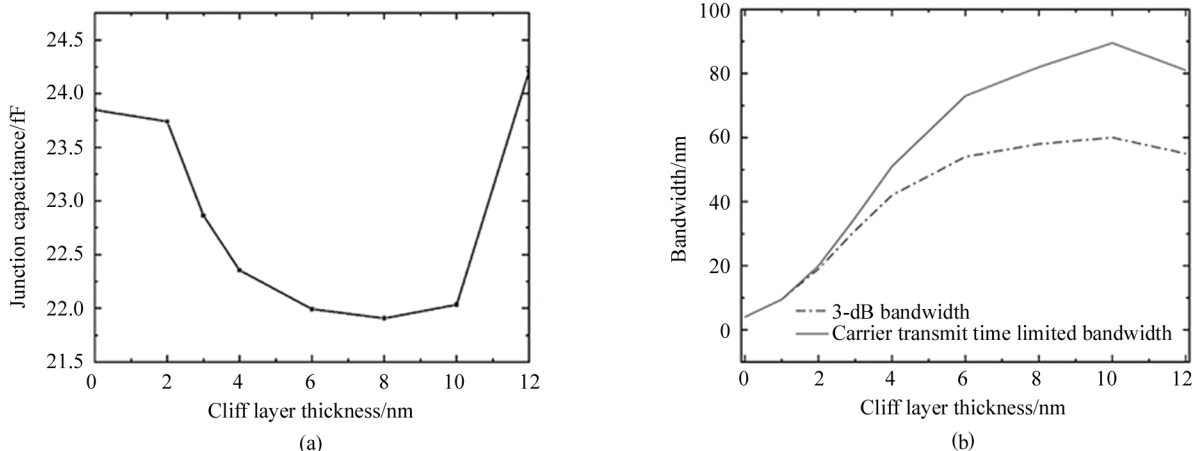


图 6 崖层厚度对光探测器结电容和带宽的影响:(a) 结电容; (b) 带宽

Fig. 6 The influence of cliff layer thickness on junction capacitance and bandwidth: (a) Junction capacitance; (b) Bandwidth

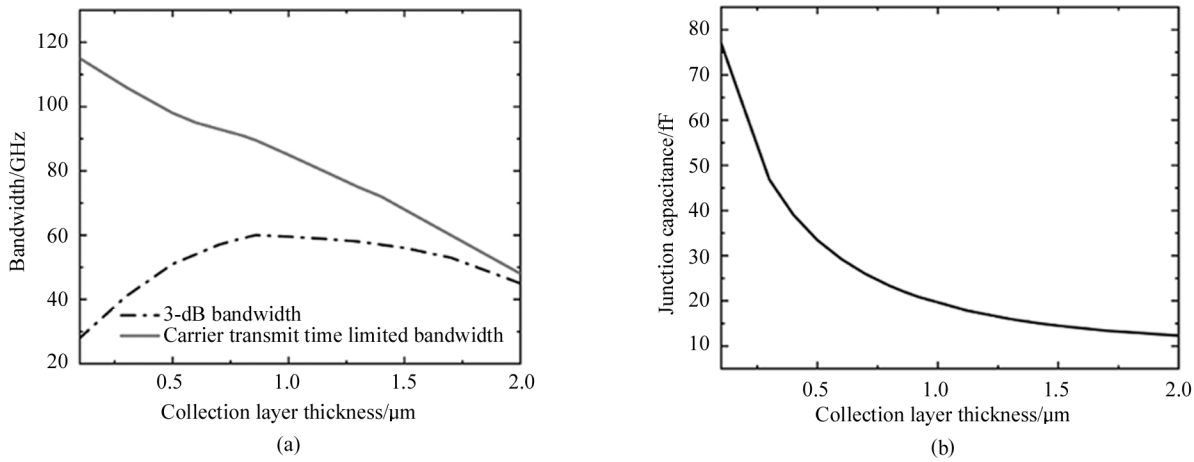


图 7 收集层厚度对光探测器带宽和结电容的影响:(a) 带宽;(b) 结电容

Fig. 7 The influence of collection layer thickness on the bandwidth and junction capacitance of photodetector:

(a) Bandwidth; (b) Junction capacitance

的结电容较大,此时器件的总带宽受到 RC 时间常数的影响较大。随着收集层变厚,耗尽区随之变宽,器件的结电容变小,器件的总带宽也逐渐提高。但是收集层厚度大于 0.86 μm 时,此时随着收集层变厚,器件的总带宽开始逐渐降低,原因是虽然结电容变小,但是因为收集层厚度的增加,电子在收集层的漂移时间增加,如图 7(a)所示,器件的载流子渡越带宽降低,导致了器件的总带宽降低。

2 器件设计和优化

为了证明 EE-MUTC-PD 在吸收层电场增强后,具有较厚的吸收层同时还能保持较高的频率响应,本文设计了具有相同吸收层厚度的 UTC-PD、DDR-PD 进行比较,外延层结构参数如表 3 和表 5 所示。

表 5 DDR-PD 的外延层参数

Tab. 5 Epitaxial layer parameters of DDR-PD

Layer	Material	Thickness /nm	Bandgap /eV	Doping / cm^{-3}
P contact	InGaAs	50	0.73	$\text{P } 2 \times 10^{19}$
Electron barrier	InGaAsP	20	0.95	$\text{P } 1 \times 10^{19}$
P absorption	InGaAs	660	0.73	$\text{P } 1 \times 10^{15}$
Drift	InGaAsP	120	0.8	$\text{N } 2 \times 10^{15}$
Collection	InP	860	1.35	$\text{N } 1 \times 10^{14}$
N contact	InP	300	1.35	$\text{N } 1 \times 10^{19}$

2.1 响应度

光探测器的响应度主要由吸收层厚度决定,表征了光探测器将光转换为电流的效率,本文的 EE-

MUTC-PD 是 N 侧背入光,所以 P 侧电极反射率设为 0.6,响应度可以由式(4)计算^[18,19]:

$$R \approx \frac{\eta\lambda}{1.24}, \quad (1)$$

$$\eta = (1 + 0.6e^{-\alpha W_A})(1 - e^{-\alpha W_A}), \quad (2)$$

式中, R 是响应度, η 是量子效率, λ 是入射光的波长, α 是材料的吸收系数, W_A 是吸收层厚度。图 8 是光探测器的输出电流随着入射光功率的变化趋势,图中直线的斜率是仿真得出的光探测器响应度,结果表明当光探测器的吸收层厚度为 660 nm 时,响应度为 0.64 A/W。

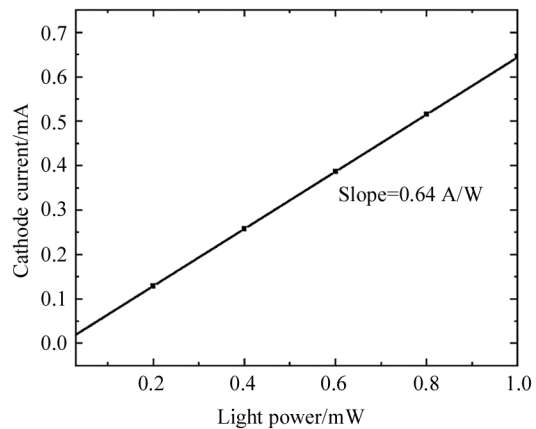


图 8 光探测器的响应度

Fig. 8 Responsivity of photodetector

2.2 结电容

光探测器的电容由势垒电容和扩散电容共同构成,本文研究的光探测器工作在反向偏压,所以只需要考虑势垒电容^[20]。结电容可以由式(3)计算^[21],

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{W}, \quad (3)$$

式中, ϵ_0 和 ϵ_s 分别是真空介电常数和半导体的等效介电常数, A 是光探测器 PN 结的面积, W 是耗尽区的宽度。因为光探测器有多层电介质, 等效介电常数由式(4) 计算^[22]:

$$\epsilon_s = \left[\sum_{m=1}^n \frac{W_m}{W_T \epsilon_m} \right]^{-1}, \quad (4)$$

$$W_T = W_1 + W_2 + \dots + W_n, \quad (5)$$

式中, W_m 是耗尽区的宽度, ϵ_m 是第 m 层电介质的相对介电常数, W_T 是耗尽区的总厚度。

由式(6) 可得, 光探测器的结电容与 PN 结面积成正比, 与耗尽区宽度成反比。图 9 是 3 种光探测器的 C-V 特性曲线, 由图可得, 在 4 V 反向偏压下, EE-MUTC-PD 的结电容介于 UTC-PD 和 DDR-PD 之间, UTC-PD 的结电容最大, 因为 UTC-PD 的吸收层是由高掺材料组成, 这个区域是未耗尽的, 所以 UTC-PD 的耗尽区宽度最窄, 结电容最大。而 EE-MUTC-PD 吸收区由部分耗尽和耗尽区两部分共同组成, 相比较 DDR-PD 吸收区完全由耗尽区构成, EE-MUTC-PD 的耗尽区宽度相对较窄, 所以 DDR-PD 的结电容小于 EE-MUTC-PD 的结电容。

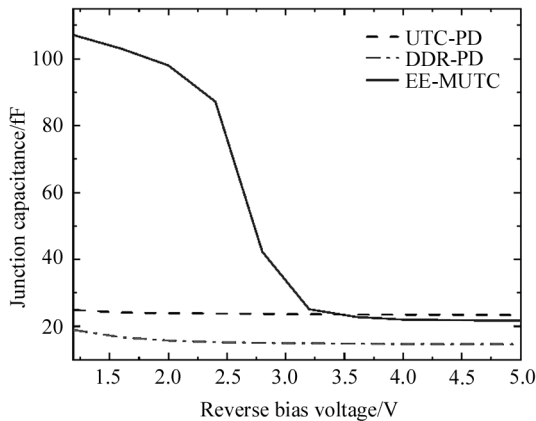


图 9 不同偏压下 3 种光探测器的结电容

Fig. 9 The junction capacitance of three types of photodetectors under different bias voltages

2.3 频率响应

图 10(a) 是 UTC-PD、DDR-PD 和 EE-MUTC-PD 的频率响应, 图 10(b) 和图 10(c) 分别是不同偏压下和不同器件有源区直径下光探测器的带宽, 图 10(d) 是入射光功率对 3 种探测器的影响。由图 10(a) 可以得到, 当吸收层厚度逐渐增加后, 光探测器的带宽会随之减小, 原因是随着厚度增加, 载流子在吸收

层的渡越时间也会增加, 会导致光探测器的载流子渡越带宽的减小, 进而影响光探测器的总带宽。在 UTC-PD 中, 吸收区由高掺材料组成, 这个区域是非耗尽的, 没有引入电场, 所以电子在吸收区是扩散运动, 当吸收层厚度增大后, 带宽会急剧降低。在 DDR-PD 中, 吸收区是本征的, 这个区域是耗尽的并且引入了很强的电场, 空穴在这个区域以漂移速度运动, 空穴的漂移速度远小于电子的漂移速度, 所以随着吸收层增厚, 空穴的漂移时间增加, 会导致带宽下降较快。对于 EE-MUTC-PD, 随着吸收层厚度增加, 和 UTC-PD 以及 DDR-PD 相比, 带宽下降的较为缓慢。原因是 EE-MUTC-PD 吸收区分为部分耗尽和耗尽两个区域, 在部分耗尽区域引入了电场, 此时空穴在弛豫时间内被响应到外电路, 电子以漂移速度通过, 在耗尽区, 由于这个区域比较窄, 电子和空穴都是以漂移速度通过, 空穴在这个区域的漂移时间基本不影响器件带宽。所以随着吸收层厚度的增加, EE-MUTC-PD 的带宽下降的较为缓慢。

图 10(b) 是反向偏压对 EE-MUTC-PD 响应速度的影响, 由图可以得到随着给光探测器加的反向偏压逐渐变大, 光探测器内部电场逐渐增强, 缩短了器件内部载流子渡越时间, 光探测器的带宽逐渐增大, 在 4 V 时达到最大, 为 60 GHz。当所加偏压大于 4 V 后, 器件带宽逐渐保持在 57 GHz。图 10(c) 是器件直径对 EE-MUTC-PD 总带宽的影响, 由图可以得到随着器件直径增加, 器件的结电容逐渐增大, 光探测器的 RC 时间常数限制的带宽减小, 导致光探测器的总带宽逐渐减小。在器件直径为 8 μm 时, 带宽为 81 GHz, 当器件直径增加到 16 μm 时, 器件带宽为 60 GHz, 当器件直径达到 20 μm 时, 此时器件的带宽最低, 为 49 GHz。

由图 10(d) 可以得到, UTC-PD 吸收区是高掺的, 当低光功率注入时光探测器吸收区没有电场, 光生载流子在吸收区以扩散方式通过。当高光功率注入时, 光探测器吸收区产生电场, 加速了光生载流子在吸收区的运动, 提高了 UTC-PD 的带宽。对于 DDR-PD, 由于吸收区是低掺的, 当入射光功率逐渐增大后, 光探测器的带宽会逐渐减小。EE-MUTC-PD 的吸收区由渐变掺杂部分和本征部分共同组成, 当低光功率注入时光探测器吸收区会产生电场, 加速了光生载流子在吸收区的运动, 所以 EE-MUTC-PD 在入射光功率为 1 mW 以内时仍能保持高带宽。

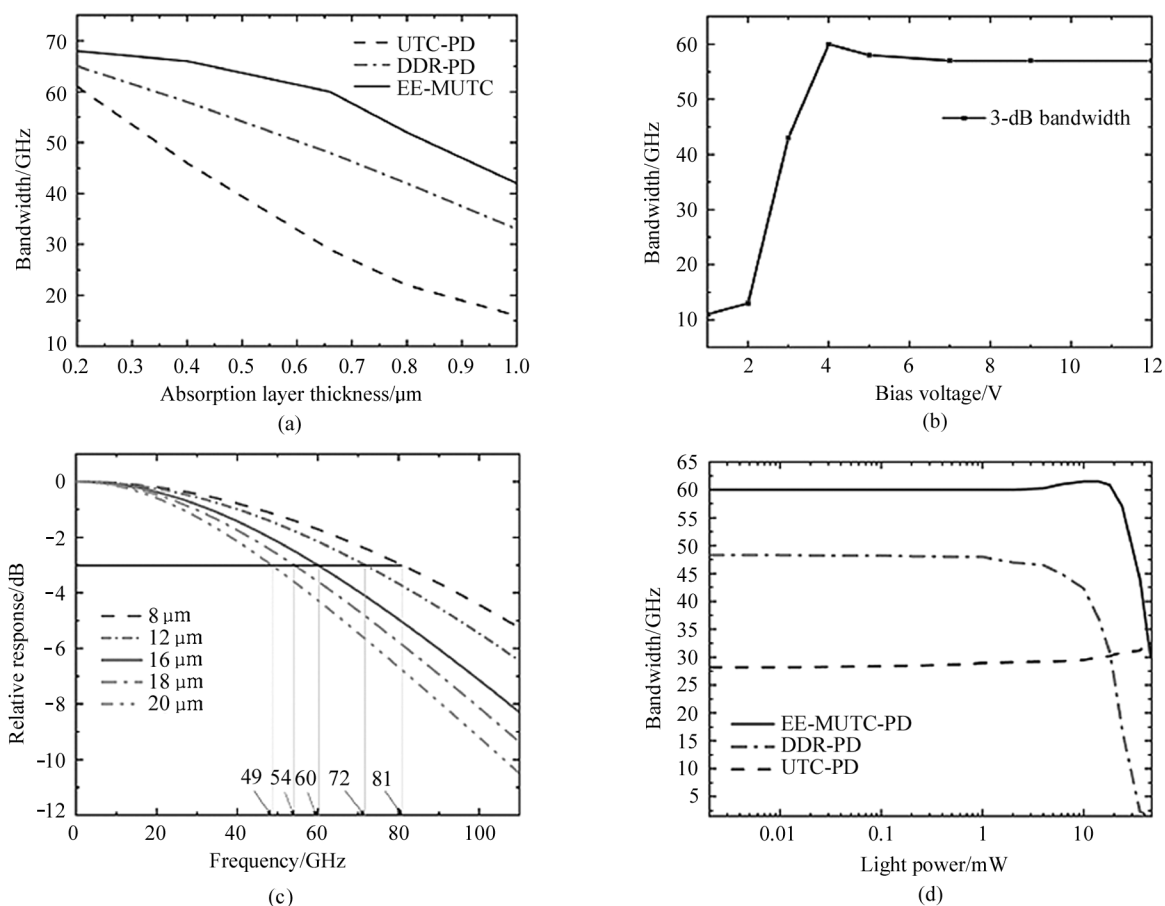


图 10 光探测器的频率响应,入射光功率对光探测器带宽的影响:(a) 吸收层厚度对光探测器的影响;(b) 不同偏压下 EE-MUTC-PD 的带宽;(c) 不同有源区直径下 EE-MUTC-PD 的带宽;(d) 入射光功率对光探测器带宽的影响

Fig. 10 Frequency response of photodetectors, influence of incident optical power on photodetector bandwidth:

- (a) The influence of the thickness of the absorption layer on the photodetector;
- (b) Bandwidth of EE-MUTC-PD under different bias voltages;
- (c) Bandwidth of EE-MUTC-PD with different active region diameters;
- (d) Influence of incident optical power on photodetector bandwidth

3 结论

在本文中提出了一个具有 EE-MUTC-PD, 与传统的 UTC-PD 和 DDR-PD 不同, 通过引入渐变掺杂吸收区, 使得光探测器吸收区分为部分耗尽和耗尽区两个部分, 有效地提高了器件内部载流子的输运效率, 使得光探测器在低光功率注入和具有厚吸收层时仍能保持较大的频率响应。在 4 V 偏压下, EE-MUTC-PD 在 660 nm 吸收层厚度时, 带宽达到了 60 GHz, 响应度达到了 0.64 A/W。在下一代 800 Gb/s 光通信系统中, EE-MUTC-PD 可以作为一个有吸引力的选择。

参考文献:

[1] ELBY S. Evolution of telecom carrier networks to meet

explosions of cloud services[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 22-26, 2015, Los Angeles, California, United States. Washington, DC, USA: Optica Publishing Group, 2015: Tu2H. 5.

[2] MANILOFF E, GAREAU S, MOYER M. 400 G and beyond: Coherent evolution to high-capacity inter data center links [C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2019: 1-3.

[3] IEEE 802.3 Ethernet Working Group. IEEE 802.3 industry connections NEA ad Hoc ethernet bandwidth assessment part II [EB/OL]. (2020-04-03) [2022-04-24]. https://www.ieee802.org/3/ad_hoc/bwa2/BWA2_Report.pdf.

[4] 800 G-FR4 technical specification [EB/OL]. (2021-06-08) [2022-04-24]. https://static.s123-cdn-static-d.com/uploads/2598123/normal_60bf88b173c87.pdf.

[5] TIAN Y, LIN Y X, ZHENG J Y, et al. 800 Gb/s-FR4 specifi-

- cation and interoperability analysis[C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2021; 1-3.
- [6] 800G Pluggable MSA group. 800G MSA white paper[EB/OL]. (2020-03-12) [2022-04-24]. https://static.s123-cdn-static-d.com/uploads/2598123/normal_5e69e237de8a9.pdf.
- [7] LI G Q, DUAN X F, YUAN W F, et al. Quasi-resonant cavity enhanced photodetector with a subwavelength grating[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(3): 031301.
- [8] SHIMIZU N, WATANABE N, FURUTA T, et al. InP-InGaAs uni-traveling-carrier photodiode with improved 3 dB bandwidth of over 150 GHz[J]. Photonics Technology Letters, 1998, 10(3): 412-414.
- [9] ISHIBASHI T, SHIMIZU N, KODAMA S, et al. Uni-traveling-carrier photodiodes[C]//Ultrafast Electronics and Optoelectronics, Vol. 13 of OSA Trends in Optics and Photonics Series, March 17, 1997, Incline Village, Nevada, United States. Washington, DC, USA: Optica Publishing Group, 1997: UC3.
- [10] WANG X, DUAN N, CHEN H, et al. InGaAs-InP photodiodes with high responsivity and high saturation power[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(16): 1272-1274.
- [11] LI Z, PAN H P, CHEN H, et al. High-saturation-current modified uni-traveling-carrier photodiode with cliff layer[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(5): 626-632.
- [12] SHI T, XIONG B, SUN C Z, et al. Back-to-back UTC-PDs with high responsivity, high saturation current and wide bandwidth[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(2): 136-139.
- [13] ACHOUCHE M, MAGNIN V, HARARI J, et al. High performance evanescent edge coupled waveguide uni-traveling-carrier photodiodes for >40 Gb/s optical receivers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(2): 584-586.
- [14] WANG F L, ZHANG B J, WANG L. High-performance inverted evanescently coupled waveguide integrated MUTC-PD with high response speed[J]. Applied Optics, 2021, 60(34): 10696-10703.
- [15] SILVACO International. ATLAS User's manual-device simulation software[M]. Santa Clara, CA: SILVACO International, 2010.
- [16] SRIVASTAVA S, SHIVANI. Simulation study of InP-based uni-traveling carrier photodiode[D]. Cincinnati, Ohio, USA: University of Cincinnati, 2003.
- [17] WEN H F, NIE Q H, XU T F, et al. Photoresponse analysis for uni-traveling-carrier photodiodes[C]//2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), September 9-11, 2011, Ningbo, China. New York: IEEE, 2011: 2753-2756.
- [18] SRIVASTAVA S, ROENKER K P. Numerical modeling study of the InP/InGaAs uni-traveling carrier photodiode[J]. Solid State Electronics, 2004, 48(3): 461-470.
- [19] KATO K. Ultrawide-B and/high-frequency photodetectors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(7): 1265-1281.
- [20] ISHIBASHI T, FURUTA T, FUSHIMI H, et al. InP/InGaAs uni-traveling-carrier photodiodes[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2000, 83(6): 938-949.
- [21] VIALLET J E, MOTTET S, HUEROU L L, et al. Photodiode for coherent detection; modeling and experimental results[J]. Le Journal De Physique Colloques, 2010, 49: C4-321-C4-324.
- [22] YUAN W F, DUAN X F, LI G Q, et al. High-speed and large-responsivity synchronous-traveling carrier photodetector[J]. Applied Optics, 2021, 60(30): 9512-9518.

作者简介:

段晓峰 (1976—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子器件和光电子集成电路在光通信网络中的应用方面的研究。