

高速单行载流子光电二极管的近弹道优化设计

甄政¹, 郝然^{2*}, 邢东³, 冯志红^{3**}, 金尚忠²

¹浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310007;

²中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;

³中国电子科技集团第十三研究所, 河北 石家庄 050051

摘要 基于近弹道优化的方法提出了一种高性能的单行载流子光电二极管(UTC-PD)的设计方案,用该方案制备的 UTC-PD 具有大的响应速度、响应度和饱和输出,且可减轻负载电压摆幅效应。设计的新光电二极管采用具有渐变掺杂的部分耗尽吸收层。在收集层底部插入 p 型掺杂薄电荷层,对器件内部电场进行了优化设计,让光生电子以过冲速度漂移,这样可减少电子的渡越时间,并使器件具备了高偏置电压操作能力,从而增大 3 dB 带宽,提升饱和性能。仿真分析表明,在 8 V 的高反向偏置电压条件下,有源区面积为 $16 \mu\text{m}^2$ 的该器件可以获得超过 86 GHz 的 3 dB 带宽,响应度为 0.17 A/W。

关键词 光电子学; 光电二极管; 单行载流子光电二极管; 高速; 近弹道优化

中图分类号 TN364

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1006003

Nearly-Ballistic Optimization Design of High-Speed Uni-Traveling-Carrier Photodiodes

Zhen Zheng¹, Hao Ran^{2*}, Xing Dong³, Feng Zhihong^{3**}, Jin Shangzhong²

¹College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310007, China;

²College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

³No. 13 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050051, China

Abstract Based on the nearly-ballistic optimization method, a high performance uni-traveling-carrier photodiode (UTC-PD) design scheme is proposed in this paper. The UTC-PD prepared by this scheme has high response speed, high responsivity, and large saturation output, and can alleviate the load voltage swing effect. The designed novel photodiode uses a partially depleted absorption layer with gradient doping. A thin p-type doped charge layer is inserted at the bottom of the collection layer. The internal electric field of the device is optimized to make the photogenerated electrons drift at the overshoot speed, reduce the electron transit time, make the device have high bias voltage operation ability, and therefore increase the 3 dB bandwidth and improve the saturation performance. Simulation results show that under the condition of high reverse bias voltage of 8 V, the device with an active area of $16 \mu\text{m}^2$ can obtain a 3 dB bandwidth exceeding 86 GHz with a responsivity of 0.17 A/W.

Key words optoelectronics; photodiodes; uni-traveling-carrier photodiode; high speed; nearly-ballistic optimization

OCIS codes 250.0040; 230.0250; 230.5160; 230.5170

1 引 言

随着微波和毫米波(MMW)技术的持续发展以及应用普及(如可应用于传感器网络、相控阵雷达天线和宽带无线光纤系统^[1-2]),人们对通信速率的需求呈现指数增长,毫米波(30~300 GHz)频段引起

了科学界极大的研究兴趣。光电二极管(PD)具有高响应速度,决定整个系统的最大允许工作频率和动态范围,被认为是未来高频微波和毫米波系统的关键^[3-4]。1997年,日本电信电话株式会社(NTT)实验室 Ishibashi 等^[5]首次提出了单行载流子光电二极管(UTC-PD)架构。UTC-PD 采用 p 型高掺杂

收稿日期: 2020-03-26; 修回日期: 2020-06-01; 录用日期: 2020-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61975182, 61575174)、浙江省杰出青年基金(LR16F050002)、国防实验室开放课题

* E-mail: ran.hao@cjlu.edu.cn; ** E-mail: ga917vv@163.com

层进行光吸收,仅电子作为有源载流子在收集区漂移,电子的迁移率远高于空穴迁移率,这极大地提高了器件的响应速度,同时减弱了空间电荷效应,提高了器件的饱和电流。UTC-PD可以同时满足高速和大功率的实际需求。

在过去的10年中,国内外研究人员对UTC-PD进行了大量研究,设计了许多新颖优良的结构,大幅提高了UTC-PD的性能^[6-14]。Chtioui等^[6]提出了具有非均匀掺杂分布的集电极设计,得到的UTC-PD的1 dB饱和电流为120 mA。通过增加一层耗尽吸收层,Shi等^[7]设计的背靠背型改进型UTC-PD(MUTC-PD)可获得0.86 A/W的响应度和28.3 GHz的带宽。Chtioui等^[8]设计的MUTC-PD的带宽和响应度分别大于20 GHz和0.92 A/W,并且具有在10 GHz时大于100 mA的高饱和电流。通过增加崖层可以增强异质结处的电场并使其向吸收层延伸,从而增大带宽和饱和电流^[9],Li等^[10]设计的带有崖层的UTC-PD具有24 GHz的带宽和144 mA的饱和电流。近弹道型UTC-PD(NBUTC-PD)具有高输出功率,Shi等^[11]设计了12 μm^2 的超快NBUTC-PD,能够实现325 GHz的带宽和16 mA的饱和电流,但是器件响应度仅为0.015 A/W,微弱光信号探测能力不足。Lin等^[12]设计了共面波导集成的UTC-PD,实现了65 GHz带宽。Runge等^[13]设计的波导集成的MUTC-PD阵列响应度和带宽分别达到0.46 A/W和28 GHz。Zang等^[14]提出了工作在1064 nm波长的UTC-PD,其具有98%的量子效率及2 GHz的带宽。这些研究虽然报导了UTC-PD的优势,但报道的带宽都在40 GHz以下,不能满足日益增长的数据需求。

针对这一问题,本文设计了一种近弹道优化型单行载流子光电二极管(NB-MUTC-PD)。NB-MUTC-PD的吸收层采用了渐变掺杂吸收层和耗尽吸收层复合的部分耗尽结构,增强了非耗尽区的电场,加快了电子迁移,从而增大了器件的带宽。本文提出的NB-MUTC-PD的收集层设计在耗尽吸收层与接触层中插入了p型掺杂薄层,对收集层的电场分布进行优化,从而充分利用电子的近弹道传输现象,让电子维持大的过冲速度,提高了响应速度。本文利用TCAD软件完成了器件的光电特性仿真。器件的3 dB带宽能够大于86 GHz,响应度达到0.17 A/W。

2 单行载流子光电二极管模型及近弹道优化结构

2.1 仿真模型

使用TCAD软件构建NB-MUTC-PD器件结构并分析器件的光电特性,从物理仿真器得到的结果被用来预测器件性能并进行深入分析。采用漂移-扩散模型来描述载流子的运输过程,通过求解泊松方程、载流子输运方程和载流子连续性方程获取器件特征^[15]。

泊松方程可表示为

$$\nabla^2\psi = -\frac{\rho}{\epsilon}, \quad (1)$$

式中: ψ 是静电势; ϵ 是介电常数; ρ 是空间电荷密度; ∇ 为哈密顿算符。

载流子输运方程可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{J}_n = q\mu_n n \mathbf{E} + qD_n \nabla n \\ \mathbf{J}_p = q\mu_p p \mathbf{E} - qD_p \nabla p \end{cases}, \quad (2)$$

式中: n 为电子浓度; p 为空穴浓度; \mathbf{J}_n 和 \mathbf{J}_p 分别为电子电流密度和空穴电流密度; μ_n 和 μ_p 分别为电子迁移率和空穴迁移率; D_n 和 D_p 分别为电子扩散系数和空穴扩散系数; q 是电子电荷。

载流子连续性方程可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n \\ \frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p \end{cases}, \quad (3)$$

式中: G_n 和 G_p 分别为电子和空穴的产生速率; R_n 和 R_p 分别为电子和空穴的复合速率。

此外,浓度依赖迁移率模型、平行电场依赖迁移率模型、Shockley-Read-Hall复合模型和俄歇复合模型等物理模型在仿真中被使用。

2.2 NB-MUTC-PD 器件结构

UTC-PD的器件结构通常由p金属接触层-阻挡层-吸收层-收集层-n金属接触层构成,其中主要功能层是吸收层和收集层。对于传统的UTC-PD,吸收层一般由单层或多层p型高掺杂层组成,收集层通常采用单层n型低掺杂层。光生载流子在吸收层中产生并进行扩散运动,电子进入收集层后,作为唯一有源载流子快速漂移并被收集。

基于以上基本架构和工作原理,本文提出了采用近弹道优化对UTC-PD的吸收层和收集层进行了优化设计,以提升器件的高速响应能力,NB-MUTC-PD的外延层具体结构如表1所示。吸收层的优化设计在于用部分耗尽吸收层结构代替了传统

的高掺杂吸收层。部分耗尽层由单层渐变高掺杂吸收层和单层耗尽吸收层组成。采用单层渐变高掺杂吸收层可以增强吸收层内的电场并增大势能梯度,促进电子在吸收层内的快速运输。通过增加单层耗尽吸收层可以增大器件带宽并提高量子效率。对收集层进行了近弹道优化设计,在低掺杂收集层和 n 型金属接触层中间插入了经过设计的 p 型电荷层。优化后的收集层结构可以优化吸收层中的电场分

布,维持电场强度,并充分利用电子运输中的速度过冲^[16]现象实现快速渡越。过冲现象意味着载流子的速度在相关尺寸内会超过它的经典值,在 UTC-PD 中电子在收集层中的过冲速度能达到 4×10^7 cm/s,高于电子在吸收层中的饱和速度(2.6×10^7 cm/s)。通过在吸收层和收集层中间加入过渡层,可减小吸收层和收集层之间的导带不连续性,削弱其对载流子运输的阻碍。

表 1 NB-MUTC-PD 器件的外延层结构

Table 1 Epitaxial layer structure of NB-MUTC-PD

Layer	Material	Thickness / (10^{-10} m)	Doping level / cm^{-3}	Doping type
p-contact layer	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	400	3×10^{19}	p
Diffusion block	InGaAsP ($Q=1.1$ eV)	200	2×10^{19}	p
Graded absorption layer	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	3000	1×10^{19} (T) - 1×10^{16} (B)	p
Depletion absorption layer	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	800	1×10^{16}	p
Spacer layer I	InGaAsP ($Q=1.4$ eV)	150	2×10^{16}	n
Spacer layer II	InGaAsP ($Q=1.1$ eV)	150	2×10^{16}	n
Collector layer	InP	2800	2×10^{16}	n
Charge layer I	InP	200	1×10^{18}	p
Charge layer II	InP	100	2×10^{16}	p
Charge layer III	InP	100	6×10^{18}	n
n-contact layer	InP	4000	2×10^{19}	n
Diffusion block	$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	2000		i
Substrate	S, I, InP			

Note: Q represents band gap of material; T represents top; B represents bottom.

由于工作波长设置为 1550 nm,因此选择 InP 基 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 为器件的主要材料,其良好的晶格匹配使得器件具有高的稳定性和低的暗电流,0.73 eV 的带隙宽度使得该材料在近红外波段具有很高的光吸收效率^[17-18]。文中所有仿真器件的有源区光敏面积均设置为 $16 \mu\text{m}^2$,工作方式为背入射。

3 高速响应特性的研究

3.1 具有渐变掺杂的部分耗尽吸收层对带宽的影响

用渐变掺杂吸收层代替传统高掺杂设计,并与耗

尽吸收层相结合,可以提高电子在吸收层的迁移速度,减少吸收层的渡越时间,从而增大带宽。为了进行细致分析,以证明该优化方法的内在原理及可行性,下文同样采用由 380 nm 部分耗尽吸收层和 280 nm 收集层组成的 UTC-PD [非耗尽吸收层采用传统的三层梯形掺杂,如图 1(a)所示,图中 C 表示掺杂浓度。]、MUTC-PD [拥有与 NB-MUTC-PD 相同的吸收层设计,如图 1(a)所示] 与 NB-MUTC-PD [图 1(b)]。图 2 给出了反向偏置电压为 2 V、入射光强为 $1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 条件下,仿真获得的三种结构器件的

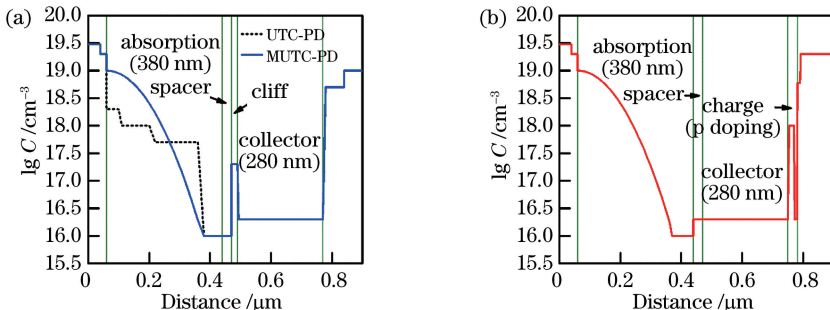


图 1 掺杂界面。(a) UTC-PD 和 MUTC-PD 的掺杂界面;(b) NB-MUTC-PD 的掺杂界面

Fig. 1 Doping interfaces. (a) Doping interface of UTC-PD and MUTC-PD; (b) doping interface of NB-MUTC-PD

3 dB 带宽。传统阶梯型掺杂的 UTC-PD 的带宽仅为 38 GHz, MUTC-PD 和 NB-MUTC-PD 的带宽分别为 63 GHz 和 64.5 GHz, 均接近 UTC-PD 带宽的 1.7 倍, 这体现出渐变掺杂的优势。

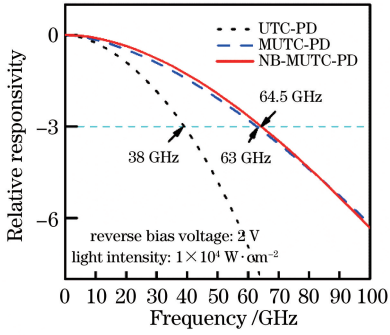


图 2 在 2 V 的反向偏置电压、入射光强为 $1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 条件下三种器件的 3 dB 带宽

Fig. 2 3 dB bandwidths of three devices at reverse bias voltage of 2 V and incident light intensity of $1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$

下面基于物理原理, 从器件的能带结构[图 3 (a)]和内部电场[图 3 (b)]对带宽进行分析。在 p 型掺杂的非耗尽吸收层中, 光生电子在内建电场的

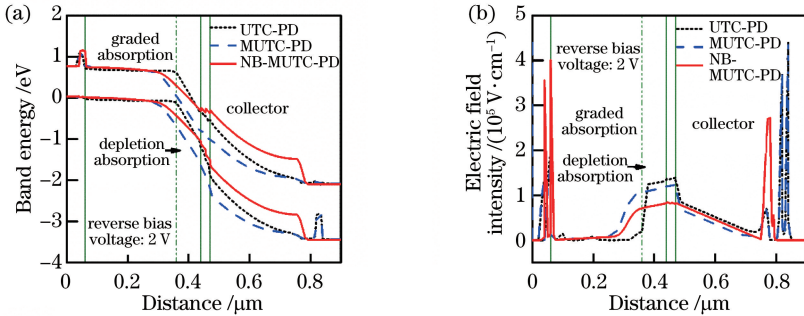


图 3 在 2 V 的反向偏置电压条件下三种器件的物理性质。(a)能带结构;(b)内部电场强度

Fig. 3 Physical properties of three devices under reverse bias voltage of 2 V.

(a) Band structure; (b) internal electric field intensity

图 2 中 NB-MUTC-PD 的带宽与 MUTC-PD 的带宽基本一致, 通过图 3 所示的能带和电场分布可以看到: 在 2 V 的反向偏置电压下两种结构的内在物理特性有差异。对于吸收层部分, NB-MUTC-PD 和 MUTC-PD 都在渐变吸收层中间出现了能带下降的现象, 但是 NB-MUTC-PD 没有采用崖层, 在吸收层中 NB-MUTC-PD 能带整体的下降趋势较平缓, 提供的势能梯度和内建电场略低于 MUTC-PD。在收集层中, NB-MUTC-PD 和 MUTC-PD 的能带下降趋势相近, 势能梯度相似, 但是 NB-MUTC-PD 的电场强于 MUTC-PD, 耗尽区几乎完全耗尽, 使得电子能够在较长区域内维

作用下开始向 n 型收集层运动, 这一过程受到内建电场和势能梯度的影响。从三种器件的能带结构[图 3 (a)]的比较中可以看到 MUTC-PD 和 NB-MUTC-PD 的能带在非耗尽吸收层就开始下降, 这增大了势能梯度, 促进了电子向收集层运输, 提高了响应速度。同时由图 3 (b) 可以看到, 采用传统梯形掺杂设计的 UTC-PD 仅在耗尽吸收层内拥有较强的电场, 非耗尽吸收层内电场很弱, 这样不利于电子运输; 采用渐变掺杂的 MUTC-PD 和 NB-MUTC-PD 在靠近耗尽吸收层的地方已经产生了 40 ~ 80 nm 厚的高电场区域, 这种掺杂分布与内建电场的关系可以表示为^[19]

$$E_{\text{built-in}}(x) = \frac{V_t}{p_0(x)} \cdot \frac{dp_0(x)}{dx} = \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{p_0(x)} \cdot \frac{dp_0(x)}{dx}, \quad (4)$$

式中: $E_{\text{built-in}}$ 是内建电场; V_t 表示热电压; $p_0(x)$ 是掺杂函数; k 是玻尔兹曼常数; T 是温度。额外的高电场区域使得电子更快地完成渡越, 并且以更高的速度进入耗尽区, 从而获得更好的过冲效果, 增大光电二极管的带宽。

持过冲速度, 减少了渡越时间。因此, 两种器件具有相似的带宽。

3.2 近弹道优化收集层对高偏压工作能力和带宽的影响

光电二极管作为光电转换器, 需要对其施加反向偏置电压以获得更大的输出。随着输出光电流的增加, 输出到负载的交流信号会产生电压摆幅叠加到偏置上, 造成器件性能下降, 而高偏置电压有助于减弱电压摆幅效应。但是, 过高的偏置电压会导致器件被击穿而毁坏, 而吸收层和收集层的主要材料 InGaAs 和 InP 的击穿电场强度分别为 $2 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 和 $5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 。从图 4 (a) 中可以看到,

当 MUTC-PD 的反向偏置电压增大时,吸收层和收集层的电场有明显的增强,反向偏置电压达到 6 V 时,吸收层的电场强度已经开始超过了 InGaAs 的击穿阈值,器件已经无法安全工作。从图 4(b)中可以明显观察到,插入了 p 型掺杂薄层的 NB-MUTC-PD 具有更大的高压工作潜力。反向偏置电压为

6 V 时,吸收层中的电场峰值为 1.6×10^5 V/cm;当反向偏置电压升到 8 V 时,NB-MUTC-PD 的吸收层电场仍然略低于 InGaAs 的击穿阈值;当反向偏置电压为 10 V 时,器件将被击穿。NB-MUTC-PD 可以更好地承受高的工作电压,与标准的 50 Ω 负载配合使用可有效削弱电压摆幅效应。

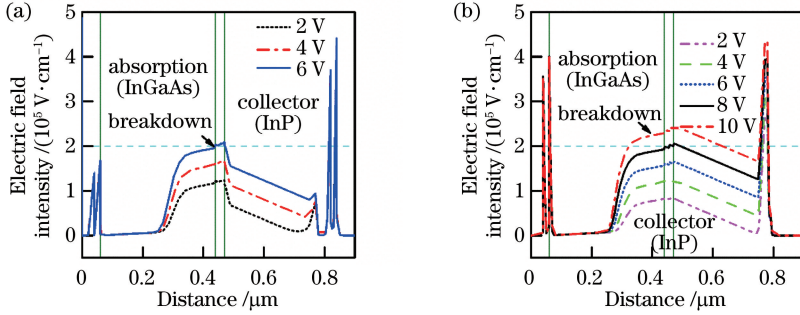


图 4 不同反向偏置电压下的内部电场强度。(a) MUTC-PD;(b) NB-MUTC-PD

Fig. 4 Internal electric field intensity at different reverse bias voltages. (a) MUTC-PD; (b) NB-MUTC-PD

尽管在反向偏置电压为 2 V、入射光强为 1×10^4 W/cm² 条件下 NB-MUTC-PD 的 3 dB 带宽与 MUTC-PD 几乎相同,但是随着工作电压的升高,NB-MUTC-PD 在高压下展现出了更好的高速响应特性。如图 5 所示,当反向偏置电压为 2 V 时,NB-MUTC-PD 和 MUTC-PD 的带宽几乎相同。随着工作电压的升高,两者的带宽都开始增大,但是 NB-MUTC-PD 的带宽增大得更快。当反向偏置电压升至 5 V 时, MUTC-PD 的带宽仅为 72 GHz,与之相比 3 V 的工作电压下 NB-MUTC-PD 已经具有了 74 GHz 的带宽。此时受限于击穿电压, MUTC-PD 无法更进一步地增大工作电压,而 NB-MUTC-PD 则随着反向偏置电压的增大达到最大带宽 86 GHz。图 4(b)展示了 NB-MUTC-PD 在不同反向偏置电压下的内部电场,NB-MUTC-PD 吸收层的电场随着反向偏置电压的增大而增大,尽管其在相同工作电压下的电场相较于 MUTC-PD 偏低,但是通过选择更大的工作电压,可以在吸收层中实现相似的电场强度,从而拥有相似的电子吸收层渡越时间和电子进入收集层的速度。在吸收层中,不同于 MUTC-PD 的电场强度在进入收集层时出现骤降和在离开收集层时出现上升峰的特点,NB-MUTC-PD 维持在一个较大且稳定的电场强度下,整个收集区处于完全耗尽的状态,电子高速通过收集区,使得器件拥有更高的响应速度。大电压下 NB-MUTC-PD 表现出比 MUTC-PD 更好的高速响应性能。随着电压的升高,电子在吸收层中受到更强的电场作用,

以更快的速度进入收集层,并在收集层电场的驱动作用下快速漂移通过。然而,收集区的电子迁移率和饱和速度随着电压的升高而降低^[20],其对电子运输的限制也在不断增大,电子无法再以大的过冲速度通过整个收集层。因此,随着反向偏置电压增大,器件带宽呈现逐渐放缓的增大趋势。

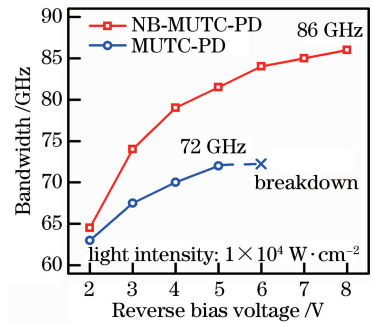


图 5 不同反向偏置电压下 NB-MUTC-PD 和

MUTC-PD 的 3 dB 带宽(入射光强为 1×10^4 W/cm²)
Fig. 5 3 dB bandwidths of NB-MUTC-PD and MUTC-PD at different reverse bias voltages (incident light intensity is 1×10^4 W/cm²)

3.3 光照强度对带宽的影响以及电压补偿

图 6 显示了 NB-MUTC-PD 带宽随着注入光强增大的变化情况。在反向偏置电压为 2 V 的工作条件下,NB-MUTC-PD 的带宽随着入射光强的增大(从 1×10^3 W/cm² 开始增大)逐渐减小,当光强逐渐达到 6×10^4 W/cm² 时带宽迅速减小,当光强达到 1×10^5 W/cm² 时带宽已经小于 10 GHz。这种现象主要是由空间电荷效应所导致的。NB-

MUTC-PD 的吸收层会因吸收光子而产生电子-空穴对,光生电子在 p 型高掺杂的渐变吸收层中向着收集层扩散,然后在耗尽吸收层、空间层、收集层的大电场作用下快速漂移。如图 7(a)所示,当光强从 $1 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 逐渐增大到 $5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 时,器件中的电子浓度也在同步增加;然而随着光强继续增大到 $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$,收集层中的电子浓度渐渐开始不再上升,吸收层中的电子开始堆积,器件逐渐进入饱和状态。大量堆积的空间电荷对器件的能带结构和内部电场造成了直接影响,进而导致器件的 3 dB 带宽快速减小。在图 7(b)中,随着光强的不断增大,器件吸收层能带下降、收集层能带上升,提供的势能梯度不断地变小。当光强达到 $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时,吸收层中的能带几乎处于水平位置,无法提供有效的势能梯度。在图 7(c)中,同样地,随着光强的增大,吸收层中的电场开始逐渐下降进而坍塌,光强达到 $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时吸收层中的电场严重坍塌,

几乎耗尽吸收层内的电场,电子开始聚集。器件内部特性出现的能带变平和电场坍塌现象,正是空间电荷效应的表现。在大光强下,吸收层无法为电子提供电场和势能梯度,导致电子无法顺利进入收集层,产生累积,而进入收集层的电子也不具备一定的初始速度,使得器件整体的电子渡越时间变长,带宽骤降。

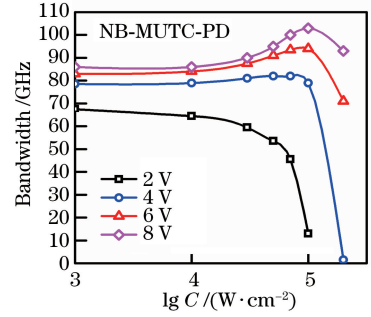


图 6 不同入射光强下 NB-MUTC-PD 的 3 dB 带宽
Fig. 6 3 dB bandwidth of NB-MUTC-PD at different incident light intensities

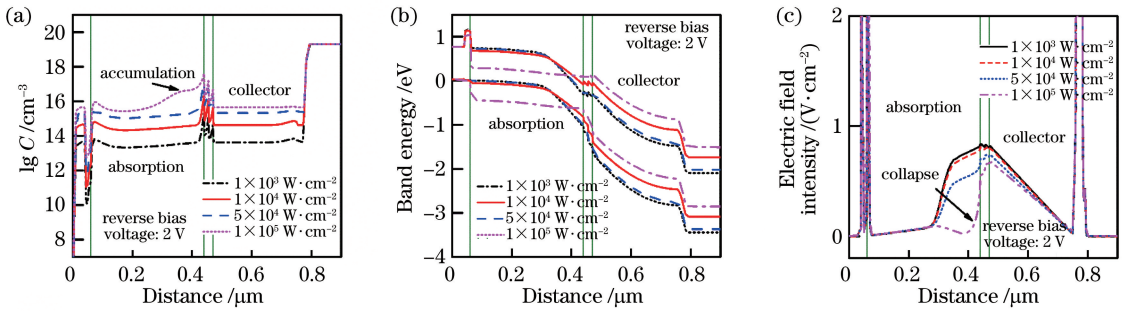


图 7 光照强度对 NB-MUTC-PD 特性的影响。(a)电子浓度;(b)能带;(c)内部电场强度
Fig. 7 Effect of light intensity on properties of NB-MUTC-PD. (a) Electron concentration; (b) energy band; (c) internal electric field intensity

通过在收集层和接触层中间插入 p 掺杂薄层进行电场优化,NB-MUTC-PD 可以在更高的工作电压下正常工作,高的工作电压可以对高光强造成的空间电荷效应进行补偿,使得器件在更高的光强下

维持高响应速度。如图 8(a)所示,在入射光强为 $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 的情况下,当工作电压从 2 V 增大到 4 V 及以上时大量的电子堆积现象消失了。图 8 (b)中,随着电压升高,能带开始下降,吸收层中的

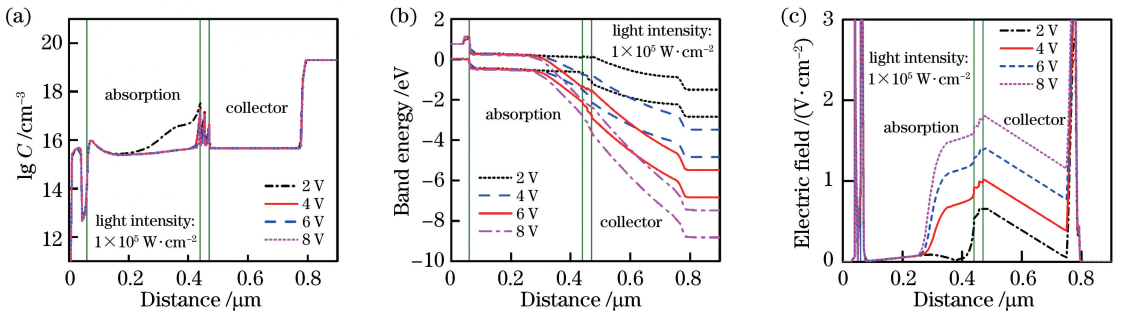


图 8 在高光照条件下电压对 NB-MUTC-PD 特性的影响。(a)电子浓度分布;(b)能带结构;(c)电场分布
Fig. 8 Effect of voltage on properties of NB-MUTC-PD under high lighting condition. (a) Electron concentration distribution; (b) energy band structure; (c) electric field distribution

势能梯度也开始不断增大,这有助于电子在吸收层中的运动。图 8(c)中电场也随着工作电压的上升而增强,这加速了电子运输,减少了电子渡越时间。因此,提高工作电压可以有效地减弱空间电荷的影响,补偿带宽。从图 6 中可以明显看到这种补偿的效果。在 2 V 的反向偏置电压下,器件带宽随着光强的增大不断减小,当光强大于 $7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 时,带宽快速下降到 13 GHz。当反向偏置电压增大到 4 V 时,对于入射光强从 $1 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 增大到 $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$,器件带宽没有出现减小,反而略微增大,这是源于吸收层的自感应电场效应^[21]会加速电子运输,直到入射光强超过 $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$,带宽才开始快速减小。随着反向偏置电压的进一步增大,这种补偿更加明显,带宽快速下降点也在向右移动,反向偏置电压为 8 V 时,一直到光强达到 $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 带宽也没有减小,反而出现一个更为明显的带宽上升峰,在光强为 $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时带宽达到了 100 GHz。

4 光电流输出特性分析

图 9 给出了 NB-MUTC-PD 和 MUTC-PD 在不同反向偏置电压下的直流光电流密度的仿真结果。NB-MUTC-PD 器件的响应度为 0.17 A/W。随着光强的增大,一定范围内输出的光电流密度也呈线性增大,当光强继续增大,空间电荷开始累积,使得输出的光电流密度逐渐饱和。饱和现象的内在机理同样受空间电荷效应的影响,具体细节已在 3.3 节中进行了分析,因此高的反向偏置电压同样会对输出光电流的饱和特性进行补偿。在 2 V 的反向偏置电压下,器件的饱和输出光电流密度为 $2.8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$,大于 MUTC-PD,当反向偏置电压

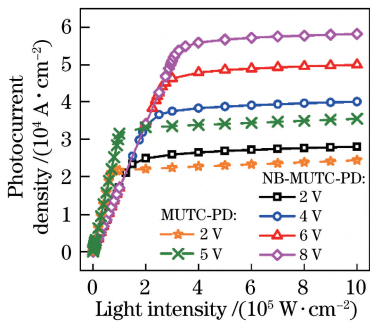


图 9 NB-MUTC-PD 和 MUTC-PD 在不同反向偏置电压下的直流光电流密度随光强的变化

Fig. 9 Variation of DC photocurrent density of NB-MUTC-PD and MUTC-PD under different reverse bias voltages with light intensity

增大到 8 V 时,器件的饱和输出光电流密度提升到了 $5.8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$,有显著增大,也明显大于 MUTC-PD 所能达到的极限。显然,反向偏置电压对输出的饱和光电流有大的影响,电压越高,饱和光电流越大,但这也受限于器件的击穿电压。因此,通过插入 p 掺杂薄电荷层进行近弹道优化得到的 NB-MUTC-PD,可以在高反向偏置电压下工作,具备更好的输出能力。

5 结 论

针对 UTC-PD 的高速优化问题,提出了新的近弹道优化方法,设计了近弹道优化型单行载流子光电二极管,并深入探索了 NB-MUTC-PD 的工作机理。设计了包括渐变掺杂吸收层和耗尽吸收层的复合吸收层结构以及具有 p 掺杂薄电荷层的近弹道收集层,该设计增大了非耗尽吸收层的电场强度和势能梯度以及收集层的电场强度,大幅提高了器件的响应速度,并且使得器件具备了在高反向偏置电压下工作的能力,使其获得了更大的带宽。当器件有源区面积为 $16 \mu\text{m}^2$ 、反向偏置电压为 8 V 时,NB-MUTC-PD 可以获得 0.17 A/W 的响应度,带宽达到 86 GHz,特殊条件下可获得超过 100 GHz 的带宽。该研究为单行载流子光电探测器提供了一种可在高偏置下高速响应的设计和 optimization 方法,为未来的高速微波和毫米波系统提供了有吸引力的解决方案。

参 考 文 献

[1] Yao J P. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
 [2] Liu Y Z, Li G H, Cui Y X, et al. Research progress in perovskite photodetectors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 010001. 刘艳珍, 李国辉, 崔艳霞, 等. 钙钛矿光电探测器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 010001.
 [3] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate [J]. Nature Photonics, 2013, 7(12): 977-981.
 [4] Wang J J, Zhao Z P, Liu J G. Research progress and development trend of balanced photodetectors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 100001. 王姣姣, 赵泽平, 刘建国. 光平衡探测器研究进展和发展趋势分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 100001.

- [5] Ishibashi T, Shimizu N, Kodama S, et al. Uni-traveling-carrier photodiodes [C] // Ultrafast Electronics and Optoelectronics, Incline Village, Nevada. Washington, D.C.: OSA, 1997: UC3.
- [6] Chtioui M, Enard A, Carpentier D, et al. High-performance uni-traveling-carrier photodiodes with a new collector design[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(13): 1163-1165.
- [7] 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.
- [8] Chtioui M, Lelarge F, Enard A, et al. High responsivity and high power UTC and MUTC GaInAs-InP photodiodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(4): 318-320.
- [9] Chen D Y, Yu X C, Wang P H, et al. Study of the influence of cliff layer on uni-traveling-carrier photodetector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0317001.
陈代尧, 余学才, 汪平河, 等. 崖层对单行载流子光电探测器的影响研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0317001.
- [10] 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.
- [11] Shi J W, Wun J M, Lin F W, et al. Ultra-fast (325 GHz) near-ballistic uni-traveling-carrier photodiodes with high sub-THz output power under a 50 Ω load [C] // 2013 IEEE Photonics Conference, September 8-12, 2013, Bellevue, WA, USA. New York: IEEE, 2013: 354-355.
- [12] Lin X L, Natrella M, Seddon J, et al. High performance waveguide uni-travelling carrier photodiode grown by solid source molecular beam epitaxy[J]. Optics Express, 2019, 27(25): 37065-37086.
- [13] Runge P, Ganzer F, Beckerwerth T, et al. Linearity of waveguide integrated modified uni-travelling carrier photodiode arrays [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(3): 246-249.
- [14] Zang J Z, Yang Z Y, Xie X J, et al. High quantum efficiency uni-traveling-carrier photodiode [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(3): 302-305.
- [15] Manual A U. Device simulation software version 5.19. 17 [EB/OL]. [2020-03-26]. <https://www.mendeley.com/catalogue/4e89baff-1e8b-3633-9454-65821ef29c33/>.
- [16] Frey J. Ballistic transport in semiconductor devices [C] // 1980 International Electron Devices Meeting, December 8-10, 1980, Washington, DC, USA. New York: IEEE, 1980: 613-617.
- [17] Liu K B, Yang X H, He T T, et al. Indium phosphide-based near-infrared single photon avalanche photodiode detector arrays [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 220001.
刘凯宝, 杨晓红, 何婷婷, 等. InP 基近红外单光子雪崩光电探测器阵列 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 220001.
- [18] Ding Y X, Li Y F, Liu H B, et al. Photon counting experiment based on InGaAs detector in daylight [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1104003.
丁宇星, 李永富, 刘鸿彬, 等. 基于 InGaAs 探测器的日光条件光子计数实验 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1104003.
- [19] Zhang L Z, Zuo Y H, Cao Q, et al. High-speed and high-power uni-traveling-carrier photodetector [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 505-510.
张岭梓, 左玉华, 曹权, 等. 单载流子光电探测器的高速及高饱和功率的研究 [J]. 物理学报, 2012, 61(13): 505-510.
- [20] Windhorn T H, Cook L W, Haase M, et al. Electron transport in InP at high electric fields [J]. Applied Physics Letters, 1983, 42(8): 725-727.
- [21] Ishibashi T, Furuta T, Fushimi H, et al. InP/InGaAs uni-traveling-carrier photodiodes [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2000, E83-C(6): 938-948.