

超宽带高饱和单行载流子光探测器研究 (特邀)

熊 兵, 晁恩飞, 罗 毅, 孙长征, 韩彦军, 王 健, 郝智彪, 汪 莱, 李洪涛

(清华大学 电子工程系 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

摘 要: 超宽带单行载流子 (UTC) 光电探测器因其仅需快速的电子输运过程, 较传统 PIN 探测器具有明显宽带优势, 是 6G 宽带无线通信、太赫兹成像、超宽带噪声发生器等亚太赫兹频段系统中的核心光电子器件之一。面向亚太赫兹频段光电转换需求, 针对 UTC 探测器中大带宽与高饱和功率之间的矛盾问题, 分别研究并突破了光生载流子高速输运机理、感性共面波导器件 (CPW) 结构等关键技术, 研制成功带宽 106 GHz、饱和输出功率 7.3 dBm 的双漂移层结构 MUTC 探测器芯片, 和带宽超过 150 GHz 的超宽带 MUTC 探测器芯片。

关键词: 光探测器; 单行载流子结构; 亚太赫兹; 高饱和功率

中图分类号: TN362 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211052

Research on ultra-wideband and high saturation power uni-traveling carrier photodetectors (*Invited*)

Xiong Bing, Chao Enfei, Luo Yi, Sun Changzheng, Han Yanjun,
Wang Jian, Hao Zhibiao, Wang Lai, Li Hongtao

(Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Ultra-wideband uni-traveling carrier (UTC) photodetectors have broadband advantages over traditional PIN detectors, as only fast electrons are required to transport in UTC photodetectors. They will be one of the key optoelectronic devices in the sub-terahertz systems, such as 6G broadband wireless communications, terahertz imaging, ultra-wideband noise generators, etc. For the requirements of optoelectronic conversion in sub-terahertz frequency band, high-speed photo-generated carrier transport mechanics and inductive coplanar waveguide (CPW) structure were studied to improve the device bandwidth and saturation power of the photodetector. A dual-drift layer structure MUTC photodetector chip with bandwidth of 106 GHz, saturated output power of 7.3 dBm, and a CPW-optimized MUTC photodetector chip with bandwidth over 150 GHz were developed.

Key words: photodetector; uni-traveling carrier structure; sub-terahertz; high saturation power

收稿日期:2021-04-04; 修订日期:2021-05-16

作者简介:熊兵,男,副教授,主要从事半导体激光器、光调制器、高功率光探测器及其光子集成等方面的研究工作。

0 引言

亚太赫兹 (sub-THz) 技术研究因其各种宽带应用前景而受到越来越多的关注,例如面向 6G 的宽带无线通信^[1-2],光谱感测^[3]和太赫兹成像^[4]、超宽带噪声发生器^[5]等。在产生宽带亚太赫兹波信号方法中,通过光学外差拍频的产生方式在频率调谐速度、光学功率放大、信号传输损耗、集成化与小型化等发明中具有明显优势,具有很好的发展和应用前景。

超宽带光电探测器是其核心元器件,基于单行载流子结构的光电探测器 (Uni-traveling-carrier photodiode),因其主要依靠快速的电子输运过程具有宽带优势,已用于亚太赫兹、THz 波的光学产生技术中^[6-7]。

文中介绍了近年来笔者等在亚太赫兹频段光电转换需求的超宽带光电探测器芯片方面的研究进展情况。针对亚太赫兹频段应用需求,光电探测器的带宽提升是最迫切的要求,其次是对高输出功率的需求。但高输出功率要求大的光电流产生、大的带宽要求更小的器件面积,进而形成的高密度光生载流子可能导致堆积问题、限制功率输出增加,因此高饱和功率和带宽提升之间存在着难以同时兼顾的矛盾问题。

破解这一矛盾,进一步加快光生载流子输运、在同等光电流条件下减小载流子密度是重要的方向。在之前的相关超宽带 UTC 探测器文献中,研究人员提出了改进型单行光电二极管 (MUTC-PD) 结构^[8],将原本全部重掺杂的吸收区,变为部分轻掺杂的耗尽区,以加速光生电子的输运。例如,美国弗吉尼亚大学 Campbell 研究组报道的台面结构 MUTC-PD,在 160 GHz 输出功率可达到 -2.6 dBm^[9]。

笔者等针对高饱和功率和带宽提升这一矛盾问题,进一步研究了分别基于耗尽区电场分布优化加速电子输运过程、基于感性共面波导电极结构调控芯片频率响应等关键技术,在超宽带性能、饱和功率特性提升方面获得了显著的进展,研制成功了带宽 106 GHz、饱和输出功率 7.3 dBm 的双漂移层结构 MUTC 探测器芯片,和带宽超过 150 GHz 的超宽带 MUTC 探测器芯片。

1 双漂移层 MUTC 光探测器芯片^[10]

当光探测器的交流光电流增加时,负载上的负载偏压波动效应变得更显著,在半周工作时使器件感

受到的电压变小,从而导致器件耗尽区内的电场变小,使器件饱和特性恶化。

为了抑制负载偏压波动效应引起光生载流子加速电场的波动问题,可以采用小于 50 Ω 的探测器负载电阻,但这也使器件光电转换效率下降,导致输出微波功率减小。

另一个方案是提高器件的偏置电压来提高器件的饱和特性,但在提高器件偏压时载流子输运容易偏离速度过冲分布所需的合适条件,引起器件带宽出现下降。

为了克服这一问题,笔者等创新性地设计并制作了台面型双漂移层 (DDL) 结构 MUTC 光探测器,且通过其亚太赫兹频段的高饱和特性测试得到验证。双漂移层结构由速度过冲加速区、速度饱和和加速区以及中间的薄层 p 型掺杂 InP 层组成。在速度过冲区,通过细致设计耗尽区内电场分布,光生电子将以过冲速度穿过以减小载流子的输运时间;速度饱和区也是加速电场加载区,确保器件有能力工作在高偏压条件下二次加速并减小负载偏压波动效应的影响,以提高器件的饱和特性,且不影响速度过冲效应。

DDL MUTC 探测器的外延结构如图 1 所示,包括 300 nm 厚的梯度掺杂 InGaAs 光吸收区和 600 nm 厚双漂移层耗尽区。双漂移层耗尽区主要由 310 nm 厚的速度过冲区和 300 nm InP 速度饱和区组成,以及耗尽区中间的 20 nm InP 电场调控层组成。通过优化速度过冲区的厚度,以实现最大程度的利用载流子速度过冲效应。一层 10 nm 厚的 n 型掺杂层也被插入过渡区之后,以提升吸收区与过渡区部分的电场强度。同时调整 20 nm 厚 P 型掺杂薄层的掺杂浓度以实现在双漂移耗尽区内的电场分布优化。

图 2 将不同偏压下普通 MUTC 和双漂移层 MUTC 探测器的电场分布进行了比较。

从仿真结果来看,普通 MUTC 探测器在各个偏压下耗尽区中的平均电场相对较高,从 3 V 下的 ~50 kV/cm 上升到 9 V 下的 ~150 kV/cm。在如此高的偏压下,速度过冲效应仅能维持非常短的时间,电子将以饱和速度在耗尽区内漂移。

然而,通过在耗尽区中间插入一层合适浓度的薄层,可产生分段式的电场结构。第一段漂移区内的平均电场在 20~50 kV/cm 范围内变化,这一电场强度落在电子速度过冲所需的电场范围。因此,电子将以过冲速度漂移穿越第一部分低电场区,然后以饱和速度

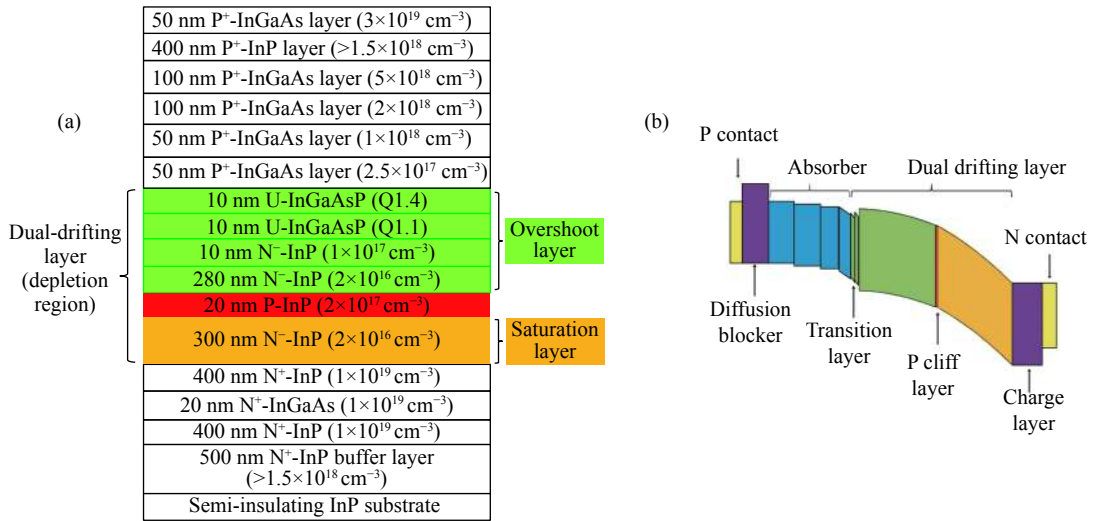


图 1 DDL-UTC 探测器的 (a) 外延结构和 (b) 加载反向偏压时的能带结构

Fig.1 Epitaxy structure of our DDL-UTC-PD (a) and (b) energy band diagram of PD under reverse bias

穿越过第二部分的高电场区域。这种双漂移层的结构不仅充分利用了速度过冲效应,厚的饱和速度区也作为电场加载区减小了负载偏压波动效应。与普通 MUTC 探测器中电子以饱和速度漂移相比,双漂移层 MUTC 探测器中载流子的输运时间可明显降低。

笔者等制作了直径为 $6 \mu\text{m}$ 的背入射型探测器芯片,并利用双激光器拍频系统来测试双漂移层探测器的频率响应和输出功率特性。

在光电流为 10 mA 时, 2 V 和 6 V 下测得的频率响应特性如图 3 所示。从频响曲线可以看到,双漂移

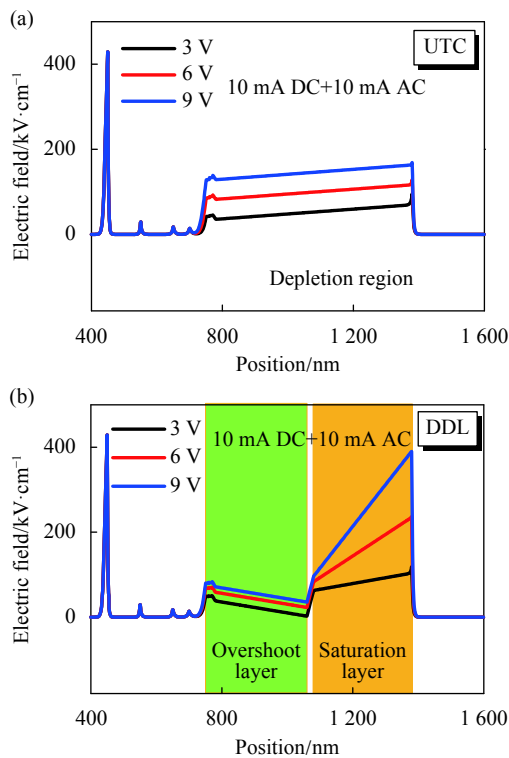


图 2 仿真不同偏压下的探测器电场分布。(a) 普通 UTC 探测器; (b) 新型双漂移层结构 UTC 探测器

Fig.2 Electric field distribution within the device under various reverse biases. (a) Typical UTC-PD; (b) DDL-UTC-PD

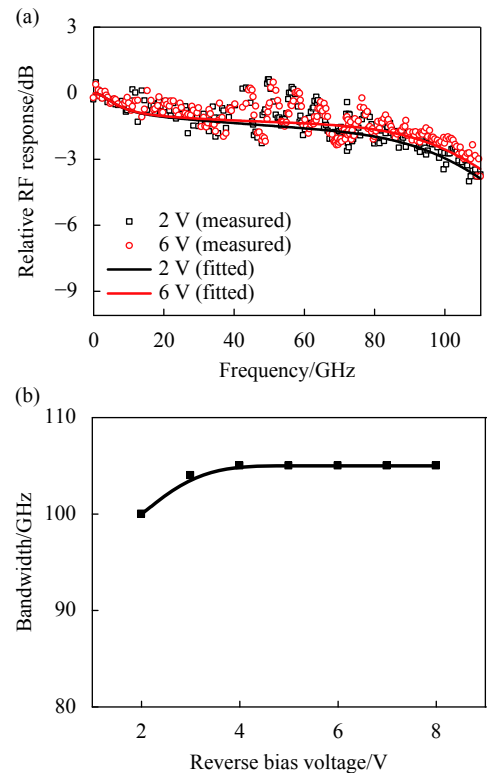


图 3 (a) 探测器 10 mA 下偏置相关的频率响应曲线; (b) 不同偏压下的 3 dB 带宽

Fig.3 (a) Frequency response at photocurrent of 10 mA ; (b) 3 dB bandwidth at different reverse biases

层探测器的带宽达到 106 GHz。图 3(b) 展示了 10 mA 时不同偏置电压下的带宽特性。2 V 下由于耗尽区还未完全耗尽,其带宽较低;当反偏电压提升到 4 V 时,器件带宽出现了明显的上升;且即便电压继续上升到 8 V 时,器件带宽依然未出现下降,这说明速度过冲区内的电场依然处于适合电子高速漂移的电场范围,速度过冲效应在高电压下依然得到保持。器件的高偏压工作能力减小了负载偏压波动效应的影响,使器件具有较高的饱和特性。

在 105 GHz 时不同偏压下 6 μm 直径的双漂移层探测器的输出功率测试曲线如图 4 所示。在 2、3、3.8 V 电压下,器件的 1 dB 压缩点光电流值分别达到了 16、23、28 mA,相应的输出功率为 0.4、5.5、7.3 dBm。

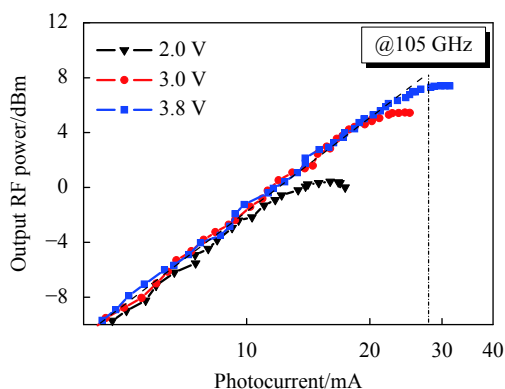


图 4 105 GHz 时,偏压相关的饱和输出功率特性

Fig.4 Voltage-dependent saturation characteristics at 105 GHz

2 基于感性 CPW 波导电极优化的超宽带 MUTC 光电探测器芯片^[11-12]

除了载流子输运限制以外,RC 常数对探测器的带宽限制也十分关键。对于亚 THz 频段的超高速光电探测器芯片,为了追求较快的载流子输运,其耗尽区往往较薄,但造成器件的电容变大,导致 RC 限制的带宽越来越成为主要的瓶颈。因此,设计合适的 RF 电极传输结构对于补偿电容和优化最终的频率响应变得更为重要。

笔者等设计的台面 MUTC-PD 外延结构如图 5 所示,InGaAs 吸收层的总厚度为 180 nm 以确保足够的光吸收,整个耗尽区厚度为 250 nm 以缩短光生电子的运输时间,同时在 P 型吸收区采用梯度掺杂以建立

内建电场,以帮助加快光生电子扩散。需要优化耗尽吸收层(图中绿色部分)的比例(厚度 X),而耗尽区的总厚度在模拟过程中是固定的(250 nm)。

50 nm P ⁺ -InGaAs, $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
400 nm P ⁺ -InP, $>2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
90- $X/2$ nm P ⁺ -InGaAs, $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
90- $X/2$ nm P ⁺ -InGaAs, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$X/2$ nm P ⁻ -InGaAs, $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
$X/2$ nm P ⁻ -InGaAs, $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
10 nm N ⁻ -InGaAsP (Q1.4), $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
10 nm N ⁻ -InGaAsP (Q1.1), $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
10 nm N ⁻ -InP, $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
(250-30- X) nm N ⁻ -InP, $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
400 nm N ⁺ -InP, $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
200 nm N ⁺ -InGaAs, $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
500 nm N ⁺ -InP, $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
400 nm N ⁻ -InP buffer layer, $>1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Semi-insulating InP substrate

图 5 MUTC-PD 的外延结构优化

Fig.5 Epitaxial structure of MUTC-PD for optimization

图 6 中显示了模拟渡越时间限制带宽与耗尽区吸收层厚度的关系。当耗尽吸收层的厚度为零时,带宽相对较低(180 GHz),此时即传统 UTC-PD 结构;然后随着耗尽吸收区增大,带宽将逐渐增加到最大值 450 GHz,厚度 X 在 100~120 nm 之间。但厚度继续增加时,由于空穴传输的延迟成为主要限制,输运带宽逐渐降低到 330 GHz,因此最终选取吸收耗尽区的厚度为 100 nm。

为了设计合适的 RF 传输电极并完全模拟探测器的带宽,采用了图 7 所示的电路模型^[13]。首先,拟合区域 1 的 S21 参数,使之与前面模拟的载流子渡越响应一致,提取代表传递时间延迟的参数 R_t 和 C_t 的值,获得 $R_t = 32.7 \Omega$ 和 $C_t = 11.8 \text{ fF}$ 。再根据探测器的结面积和材料介电常数计算分别代表 InGaAs 耗尽吸收体和 InP 耗尽区电容的 C_u 和 C_j ^[13],串联电阻 R_1 和 R_2 设置为 3 Ω 和 5 Ω,并且寄生电容 C_p 估计为 10 fF。

如前所述,由于器件的超薄耗尽区具有较大的电

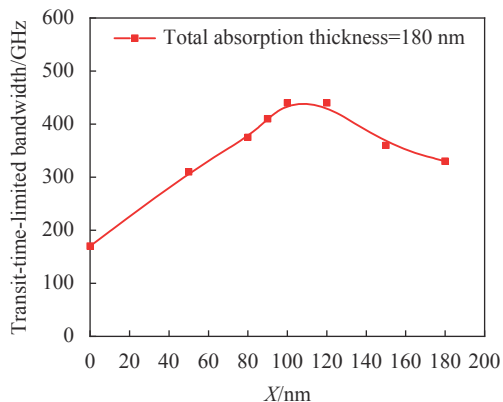


图 6 输运带宽与吸收耗尽区厚度的关系

Fig.6 Transit-time-limited bandwidth varies with thickness of depleted absorber

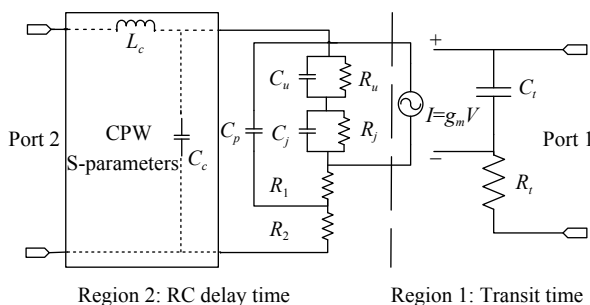


图 7 频率响应仿真电路模型

Fig.7 Circuit model for frequency response simulation

容,故而需要仔细优化 CPW 结构以调控频率响应的线型以提升器件带宽。笔者等先采用电路模型获得器件的本征频率响应,在此基础上研究了不同阻抗的 CPW 电极对频率响应的调谐作用。以直径 4.5 μm 的器件为例,频响的调谐作用如图 8 所示,可以看到随着传输线阻抗的变化,对频响的改善作用明显,其感性峰值的频率和强度都随着阻抗而改变。需要对完整的 CPW 结构进行设计,首先在电路中进行原理设计,然后通过采用基于有限元分析的三维电磁场仿真获得 CPW 电极的 S 参数,然后带回到上述电路模型中进行验证,以获得不同直径器件的所需频率响应优化结果。

笔者等进行了材料外延生长和工艺制作,直径 4.5 μm 器件的显微镜照片如图 9 所示。

台面直径为 4.5 μm 探测器芯片的频率响应测试曲线如图 10 所示。该器件的 3 dB 带宽达到 150 GHz @ 3 V-10 mA, 响应度为 0.165 A/W, 仿真曲线与实验

吻合良好。此外,可以看出,器件从 140 GHz 左右开始产生频率滚降,器件从直流到 170 GHz 时的功率滚降仅仅只有 4.6 dB,与设计吻合。

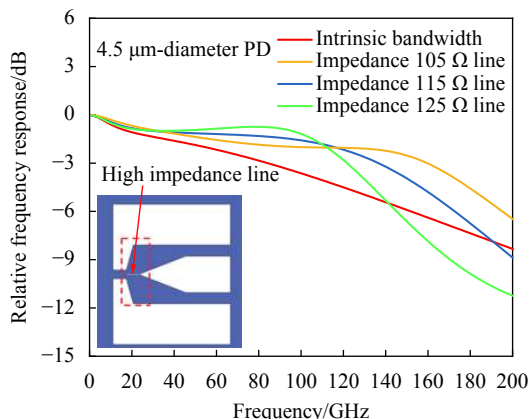


图 8 传输线的高阻抗对频率响应的调谐作用

Fig.8 Tuning effects of high impedance transmission line on frequency response

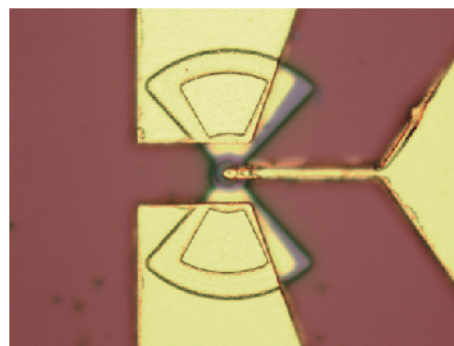


图 9 探测器芯片显微镜照片

Fig.9 Optical microscopic photo of fabricated PD

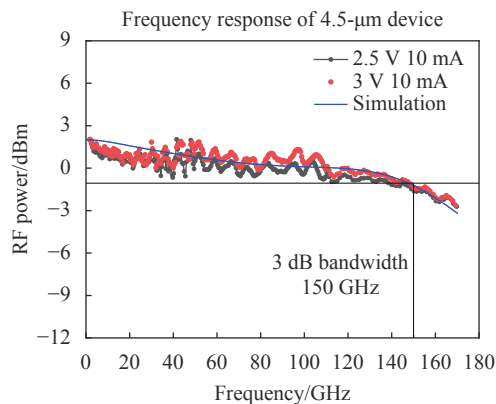


图 10 直径 4.5 μm 探测器芯片频率响应测试结果

Fig.10 Measurement results of frequency response of 4.5 μm -diameter PD

3 结 论

文中介绍了笔者等近年来在亚太赫兹频段光电转换需求的超宽带光电探测器芯片研究进展情况。针对高饱和功率和带宽提升之间存在着难以同时兼顾的矛盾问题,提出了新型双漂移层结构实现大电压工作条件下的光生载流子加速、感性 CPW 电极优化提升频率响应带宽等关键技术,分别研制出了带宽 106 GHz、饱和输出功率 7.3 dBm 的双漂移层结构 MUTC 探测器芯片,和带宽超过 150 GHz 的超宽带 MUTC 探测器芯片。

参考文献:

- [1] Shi J W, Huang C B, Pan C L. Millimeter-wave photonic wireless links for very high data rate communication [J]. *NPG Asia Materials*, 2011, 3(4): 41-48.
- [2] 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.
- [3] Nagatsuma T, Ito H, Ishibashi T. High-power RF photodiodes and their applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2009, 3(1-2): 123-137.
- [4] Dülme S, Grzeslo M, Morgan J, et al. 300 GHz photonic self-mixing imaging-system with vertical illuminated triple-transit-region photodiode terahertz emitters[C]//2019 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). IEEE, 2019: 1-4.
- [5] Shi J-W, Kuo F-M, Chiueh T, et al. Photonic generation of millimeter-wave white-light at W-band using a very broadband and high-power photonic emitter [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2010, 22(11): 847-849.
- [6] Renaud C C, Natrella M, Graham C, et al. Antenna integrated THz uni-traveling carrier photodiodes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 24(2): 1-11.
- [7] Rouvalis E, Renaud C C, Moodie D G, et al. Continuous wave terahertz generation from ultra-fast InP-based photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(3): 509-517.
- [8] Li Q, Li K, Fu Y, et al. High-power flip-chip bonded photodiode with 110 GHz bandwidth [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(9): 2139-2144.
- [9] Beling A, Tzu T C, Gao J, et al. high-speed integrated photodiodes[C]//2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), 2019: 1-3.
- [10] Li Jin, Xiong B, Luo Y, et al. Ultrafast dual-drifting layer uni-traveling carrier photodiode with high saturation current [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8420-8428.
- [11] Chao E, Xiong B, Sun C, et al. Ultrafast modified uni-traveling carrier photodiode with 3-dB bandwidth of 150 GHz[C]//2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2021: SM1D. 3.
- [12] Chao E, Xiong B, Sun C, et al. Comprehensive design method of MUTC-PD for terahertz applications[C]//Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 2020: M4A. 150.
- [13] Li J, Xiong B, Sun C, et al. Analysis of frequency response of high power MUTC photodiodes based on photocurrent-dependent equivalent circuit model [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21615-21623.