

异质结 AlGaAs/GaAs PIN 二极管结构的设计及分析

刘莉^{1,2}, 李彩艳¹, 张祁莲¹, 孙晓玮¹, 孙浩^{1*}

¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 设计了一种应用于毫米波开关及限幅器的异质结 AlGaAs/GaAs PIN 二极管材料结构, 接着对影响二极管性能的两个主要因素 (Al 掺杂量和 I 层厚度) 进行分析和优化, 然后采用分子束外延与半导体工艺流片制备出了验证器件。对该器件进行测试, 测试结果表明, 所制备的 PIN 二极管的开启电压为 1.06 V, 击穿电压为 26 V; 在 1~40 GHz 频率范围内, 该二极管的插入损耗为 1 dB 左右, 隔离度为 12 dB (频率为 30 GHz 时)。所制备二极管可应用于毫米波开关和限幅器电路中。

关键词 材料; PIN 二极管; 异质结; I - V 特性; S 参数

中图分类号 TN312+.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.231604

Design and Analysis of a Heterojunction AlGaAs/GaAs PIN Diode Structure

Liu Li^{1,2}, Li Caiyan¹, Zhang Qilian¹, Sun Xiaowei¹, Sun Hao^{1*}

¹Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Herein, a heterojunction AlGaAs/GaAs PIN diode material structure for a millimeter wave switch and limiter applications is designed, and the two main factors (i.e., the Al doping concentration and I-layer thickness) that influence the performance of the diode are analyzed and optimized. Furthermore, the verification device is fabricated via molecular beam epitaxy and semiconductor process flow sheet technique. We test the device, and the test results show that the opening voltage of the PIN diode is 1.06 V, and the breakdown voltage is 26. The insertion loss of the diode is approximately 1 dB and the isolation degree is 12 dB (when the frequency is 30 GHz), both of which are observed in the frequency range of 1-40 GHz. Thus, the designed device is suitable for millimeter wave switch and limiter circuits.

Key words materials; PIN diode; heterojunction; I - V performance; S parameters

OCIS codes 160.6000; 350.4010

1 引言

毫米波开关和限幅器是射频前端控制电路中的重要器件,其主要作用是通路切换、信号调制、波形变换、过压保护等^[1],已被广泛应用于高速宽带通

信、安检精细成像以及空间探测等领域。随着成像系统在小型化、高性能等方面的进一步要求^[2-4],其核心电路和模块通常要求具有集成度高、隔离度高、耐压能力强、工作频率高等特性^[5]。

目前,用于开关和限幅器电路的二极管类型主

收稿日期: 2020-02-13; 修回日期: 2020-03-30; 录用日期: 2020-05-25

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划

* E-mail: sh@mail.sim.ac.cn

要包括赝高电子迁移率晶体管(PHEMT管)和PIN二极管。文献[6]中的开关元器件采用的是PHEMT管,其插入损耗小于1 dB,隔离度大于40 dB,且易于集成,但它承受的功率有限。文献[7]中PIN开关的插入损耗小于1 dB,隔离度大于30 dB,并且可以承受较大的功率(39.2 dBm)。因此,在具有一定功率要求的毫米波电路与系统中,一般采用GaAs基PIN二极管作为元器件。

与同质结GaAs二极管相比,AlGaAs/GaAs PIN二极管结构异质结产生的能带差可以有效降低二极管的导通电阻,从而在减小插入损耗的同时不改变隔离度。因此,异质结AlGaAs/GaAs PIN二极管相比GaAs二极管具有更大的优势。

在设计方法上,现有对PIN二极管材料结构的设计主要以二极管的正向*I-V*(电流-电压)特性或反向电压^[8-9]为依据,但该方法只考虑了器件的直流特性,没有考虑二极管的开启电压、击穿电压、插入损耗、隔离度等。

针对上述问题,本文根据实际应用,综合考虑二极管的直流和交流特性,提出了一种应用于毫米波开关和限幅器的异质结AlGaAs/GaAs PIN二极管结构。通过优化Al掺杂浓度和I层厚度这两个关键参数,使器件的导通电阻降低,从而有效减小插入损耗;同时,该优化的二极管结构具有较高的隔离度和击穿电压。最后,对本文设计的二极管结构进行了测试,测试结果表明,本文设计制备的PIN二极管具有插入损耗小、击穿电压高和承受功率大的特点,适合应用在毫米波开关和限幅器中。

2 PIN二极管等效电路模型分析

二极管的参数主要有正向导通电阻、反向击穿电压和承受功率,这些参数的决定因素可从以下分析中得到。图1所示为PIN二极管结构及其在正向和反向偏置下的等效电路。

当PIN二极管正向偏置时,电子和空穴均注入本征I层,I层的阻抗降低,可以等效为一个电阻,此时等效电阻可以表示为 R_{on} ^[10]。 R_{on} 的计算公式为

$$R_{on} = \frac{w^2}{(\mu_n + \mu_p)I_0\tau}, \quad (1)$$

式中: w 为本征I层的厚度; μ_n 与 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率; I_0 为正向偏置电流; τ 为载流子寿命。

当反向电压施加在PIN二极管上时,电子和空穴从I层抽离,I层耗尽,二极管关断,二极管等效为一个关断电容器。该电容器的关断电容为

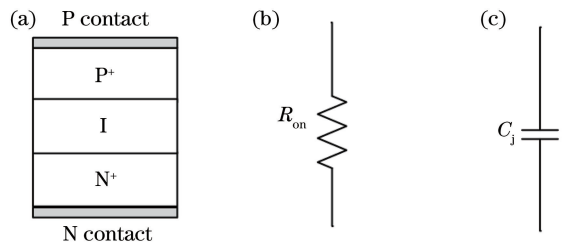


图1 PIN二极管结构及其等效电路。(a) PIN二极管结构;(b)正向偏置下的等效电路;(c)反向偏置下的等效电路

Fig. 1 PIN diode structure and its equivalent circuit.

(a) PIN diode structure; (b) forward bias equivalent circuit; (c) reverse bias equivalent circuit

$$C_j = \frac{\epsilon A}{w}, \quad (2)$$

式中: A 为PIN二极管的截面积; ϵ 为材料的介电常数。

PIN二极管的开启状态可以用电阻 R_{on} 来模拟,其插入损耗 L 和正向导通电流 J 的计算公式分别为

$$L = 20\lg(1 + R_{on}/Z_0), \quad (3)$$

$$J = \frac{qw}{2\tau} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right), \quad (4)$$

式中: Z_0 为二极管的特征阻抗; q 为电荷电量; V 为施加的电压; k 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度。可知,减小I层厚度 w 可减小电阻 R_{on} ,从而减小插入损耗,但也会减小导通电流。

PIN二极管的关断状态用关断电容 C_j 来模拟,则隔离度 α_{iso} 可以表示为

$$\alpha_{iso} = 10\lg[1 + (4\pi F C_j Z_0)^{-2}], \quad (5)$$

式中: F 为频率。当反向电压增加到足够大时,反向电流突然增大,二极管发生击穿,击穿电压 V_B 可以表示为

$$V_B = |E_{max}|w, \quad (6)$$

式中: E_{max} 为电场强度的最大值。由(6)式可知,增加I层厚度 w 可增大反向击穿电压。

PIN二极管在反向偏置时可用作限幅器,其承受的最大功率可以表示为^[11]

$$P = \frac{V_B^2}{2Z_0}. \quad (7)$$

通过上述分析可知,I层厚度 w 可以影响PIN二极管的导通电流、插入损耗、隔离度和反向击穿电压,增大I层厚度,可以提高隔离度和击穿电压,但也会增加插入损耗。因此,在设计PIN二极管时,需要根据实际需求,对材料结构进行综合考虑。一般来说,在毫米波开关及限幅器中,人们希望PIN

二极管的插入损耗尽可能低,隔离度尽可能大,同时要能承受一定的功率。本文的目的是设计出一款能同时满足开关和限幅器应用要求的异质结 AlGaAs/GaAs PIN 二极管材料结构。

3 PIN 二极管材料结构的设计

3.1 Al_xGa_{1-x}As 中 Al 掺杂组分的确定

本文提出了一种异质结 AlGaAs/GaAs PIN 二极管材料结构,表 1 给出了外延结构的材料参数。使用 TCAD 建立的材料结构示意图如图 2 所示。

表 1 外延结构的材料参数

Table 1 Material parameters of epitaxial structure

Layer	Material	Doping concentration / cm ⁻³	Thickness / μm
P-GaAs	GaAs	3 × 10 ¹⁹	0.02
P-AlGaAs	Al _x Ga _{1-x} As	5 × 10 ¹⁸	0.20
I	GaAs	None	w
N	GaAs	5 × 10 ¹⁸	0.80

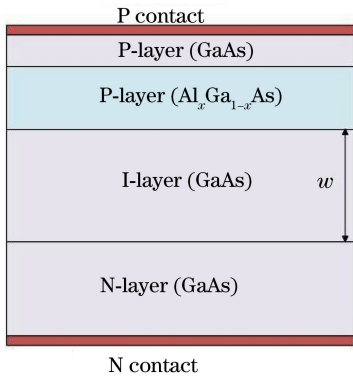


图 2 异质结 PIN 二极管结构

Fig. 2 Structure of heterojunction PIN diode

图 3 为仿真得到的异质结 PIN 二极管和同质结 PIN 二极管的插入损耗和隔离度。可以看出,异质结 AlGaAs/GaAs PIN 二极管的插入损耗比同质结 PIN 二极管的小 0.1 dB,而隔离度相同。

由以上分析可知,采用异质结 PIN 二极管结构

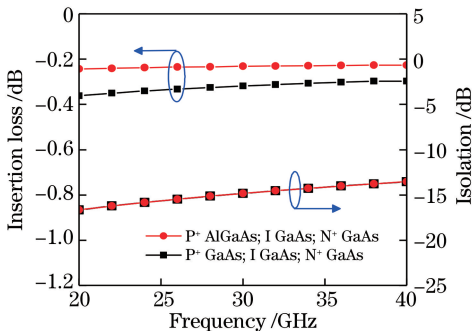


图 3 异质结与同质结的 S 参数

Fig. 3 S parameters of heterojunction and homojunction

在该 AlGaAs/GaAs 异质结结构中,P 层 AlGaAs 与 I 层 GaAs 的能带差异会产生一定的势垒高度差。当 PIN 二极管正向偏置时,空穴与电子的注入比增大,使得 PIN 二极管的导通电阻减小,因此 PIN 二极管的插入损耗降低;当 PIN 二极管反向偏置时,反向偏置电容并未发生改变,因此异质结 AlGaAs/GaAs PIN 二极管的隔离度与同质结 GaAs 二极管的相同。与同质结构相比,异质结 AlGaAs/GaAs PIN 二极管在减小器件插入损耗的同时不改变隔离度^[12-13]。

可以提高器件的射频性能。Al_xGa_{1-x}As 中 Al 组分的掺杂量对器件的射频性能来说至关重要^[14]。根据图 2 所示的材料结构,本文对不同 Al 掺杂量的 Al_xGa_{1-x}As(x=0,0.05,0.10,0.20,0.30)的插入损耗进行了仿真计算,计算结果如图 4 所示。由图 4 可知:当 x=0 时(即 GaAs),材料的插入损耗最大,在 40 GHz 时的插入损耗为 0.38 dB;当 x=0.05 时,材料的插入损耗略有减小,在 40 GHz 时的插入损耗为 0.35 dB;当 x 为 0.10~0.30 时,材料的插入损耗都较小,且插入损耗随 x 的增大略有增大(x=0.10 时的插入损耗最小,为 0.21 dB),因此最终选取 x=0.10。

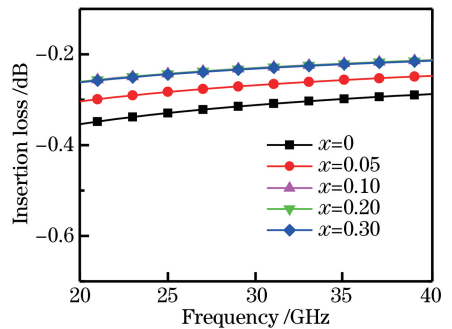


图 4 Al_xGa_{1-x}As 中的 x 对应的插入损耗

Fig. 4 Insertion loss of different x in Al_xGa_{1-x}As

3.2 I 层厚度的确定

通过第 2 节的分析可知,PIN 二极管 I 层厚度同时影响着正向导通电阻、反向等效电容和击穿电压,选取适当的 I 层厚度可使器件满足毫米波前端电路的应用要求^[15-16]。因此,本文仿真了 PIN 二极

管在不同 I 层厚度(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 μm)下的 I - V 特性、反向击穿电压和插入损耗。

由图 5 所示的仿真结果可知, I 层的厚度越薄, PIN 二极管正向导通电阻就越小。如果约定通过二极管的电流为 100 μA 时所对应的电压为开启电

压, 则当 I 层厚度 w 从 0.5 μm 增加到 2.5 μm 时, 开启电压从 1.05 V 增加到 1.2 V。如果定义反向电流超过 100 μA 时二极管击穿, 且反向击穿电压随着 I 层厚度的增加而大幅增大, 则当 w 从 0.5 μm 增大到 2.5 μm 时, 击穿电压从 17 V 增大到 64 V。

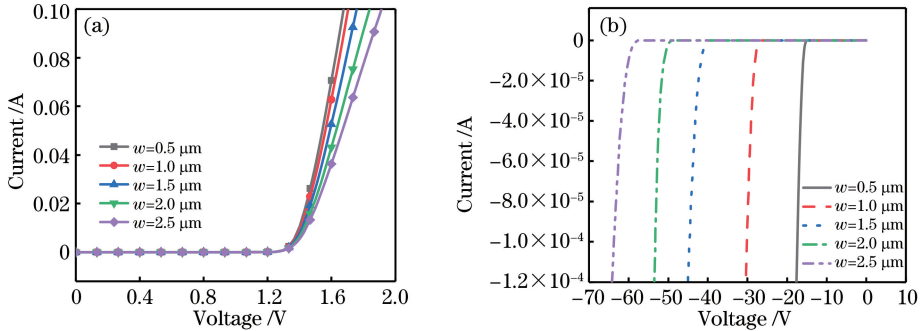


图 5 TCAD 仿真得到的不同 I 层厚度的 PIN 二极管的 I - V 特性。(a) 正向偏置; (b) 反向偏置

Fig. 5 I - V characteristics of PIN diode with different I-layer thicknesses obtained by TCAD simulation.

(a) Forward bias; (b) reverse bias

由图 6 可知, 插入损耗随 I 层厚度的增加逐渐增大, 当 w 从 0.5 μm 增大到 2.5 μm 时, 40 GHz 处的插入损耗从 0.1 dB 增大到 0.7 dB。

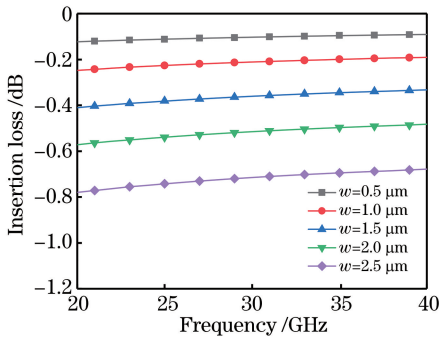


图 6 TCAD 仿真得到的不同 I 层厚度下的插入损耗

Fig. 6 Insertion loss at different I-layer thicknesses obtained by TCAD simulation

由以上分析可知, PIN 二极管的 I 层厚度越小, 插入损耗和开启电压就越小, 因此选取较小的 I 层厚度(0.5 μm)。但是随着 I 层厚度减小, 反向击穿电压也减小, 材料承受的功率较小。由于 PIN 二极管需要较低的插入损耗和较高的承受功率, 因此应选择具有较小正向导通电阻和较大反向击穿电压(大于 20 V)的 I 层厚度。综合分析后, 本文选取 I 层厚度为 1.0 μm 。

4 测试结果与分析

为了验证所设计的异质结 AlGaAs/GaAs PIN 二极管材料结构的合理性, 本研究团队利用半导体

材料外延与器件工艺平台制备出了异质结 PIN 二极管器件, 然后采用 Keysight 直流电源分析仪 N6733B 在片测量二极管的 I - V 特性(将直流电源分析仪的两个探针分别连接二极管器件的输入端口和输出端口, 输出端口接地)。设置正极端口的扫描电压为 0~2 V, 扫描电压步长为 0.02 V, 此时二极管正向导通, 得到器件的正向电压性能; 设置正极端口的扫描电压为 -20~0 V, 扫描电压步长为 0.1 V, 得到器件的反向电压特性。测量结果如图 7 所示。

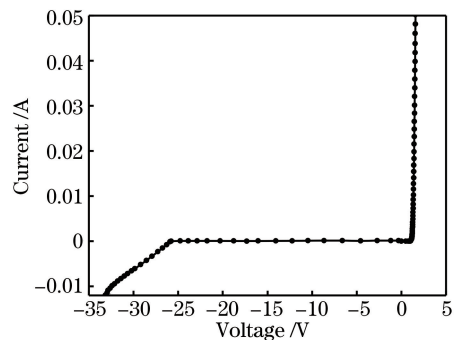


图 7 PIN 二极管的 I - V 特性测试图

Fig. 7 I - V performance of PIN diode

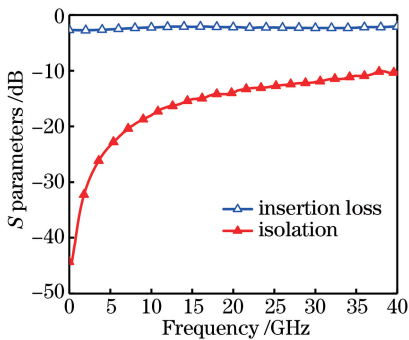
将 I - V 测试数据与仿真数据进行对比, 对比结果如表 2 所示。由表 2 可知: 测试得到的 PIN 二极管的开启电压为 1.06 V, 击穿电压为 26 V; 仿真得到的开启电压为 1.05 V, 击穿电压为 28 V。实验结果与仿真结果相吻合, 同时也满足二极管性能的预期要求。

表2 测试与仿真得到的 $I-V$ 特性的对比Table 2 Comparison of $I-V$ characteristic obtained by test and simulation

Result	Opening voltage /V	Breakdown voltage /V
Simulation	1.05	28
Test	1.06	26

PIN 二极管器件的插入损耗和隔离度是在探针台(Cascade M150)上进行在片测试的,使用矢量网络分析仪(Agilent N5245A)连接二极管芯片的射频输入端口(端口 1)和输出端口(端口 2),设置频率扫描范围为 10 kHz ~ 40 GHz,扫频步长为 100 MHz。测试时,设置矢量网络分析仪输入端的电流为 10 mA,此时二极管处在正向导通状态,对应的 S_{21} 为器件的插入损耗;设置矢量网络分析仪的输入端电压为 -5 V,此时二极管处于反向截止状态,对应的 S_{21} 为器件的隔离度。

图 8 所示为 PIN 二极管 S 参数的测量图。由测试数据可知:当频率在 1~40 GHz 范围内时,隔离度随着频率的增大而减小(隔离度从 45 dB 减小到 10 dB),当频率为 30 GHz 时,隔离度为 12 dB;插入损耗随频率的变化较小,其值约为 1 dB。对于应用于毫米波开关和限幅器的 PIN 二极管,本文设计的二极管器件的插入损耗和隔离度都符合应用要求。

图 8 PIN 二极管 S 参数测量图Fig. 8 Tested S parameters of PIN diode

5 结 论

本文从毫米波开关和限幅器的应用需求出发,设计并实现了一种性能优良的异质结 AlGaAs/GaAs PIN 二极管。分析了 Al 组分 x 对二极管性能的影响,并选取最优的 Al 组分以有效减小器件的导电电阻,从而降低材料的插入损耗。在此基础上,进一步研究了 PIN 二极管 I 层厚度对器件各个参数的影响,在考虑器件耐压能力的条件下,选取了最优的 I 层厚度,使材料的插入损耗最小。

测试后可知,本文所制备的异质结 PIN 二极管的实际性能与仿真结果基本相符。测试结果表明,该异质结 AlGaAs/GaAs PIN 二极管在 1~40 GHz 频段内具有低的插入损耗和高的耐压特性,适合应用在毫米波开关和限幅器中。

参 考 文 献

- [1] Yu Y. Research on microwave broadband PIN switch [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
于洋. 微波宽带 PIN 开关研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [2] Huang Z X. Touch-imaging method employing laser-ionized air [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(3): 031101.
黄振鑫. 激光电离空气可触控成像方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(3): 031101.
- [3] Xu D Y, Li X R, Zhao L Y, et al. Hyperspectral image quality evaluation based on multi-model fusion [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 021101.
徐冬宇, 厉小润, 赵辽英, 等. 基于多模型融合的高光谱图像质量评价[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 021101.
- [4] Zhang H, Bao G Q, Liu K. A simple calibration method of structured light 3D imaging system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141102.
张翰, 包国琦, 刘凯. 一种结构光三维成像系统的简易标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141102.
- [5] Cheng B. Research on low noise amplifier with switch and limiting function [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
程冰. 含开关与限幅功能的低噪声放大组件的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [6] Liu F G, Yao Z H. MMIC SPDT switch with positive voltage control [J]. Semiconductor Technology, 2019, 44(7): 526-530.
刘方罡, 要志宏. 一种正电压控制的单片微波集成单刀双掷开关[J]. 半导体技术, 2019, 44(7): 526-530.
- [7] Rozbicki A, Brogle J, Jain N, et al. Ka band high power AlGaAs PIN diode switches [C] // 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. June 7-12, 2009, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2009: 453-456.
- [8] Jubadi W M, Noor S N M. Simulations of variable I

- layer thickness effects on silicon PIN diode I - V characteristics [C] // IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications. New York: IEEE Press, 2010.
- [9] Idu M, Vladoianu M, Alecu G, et al. Optimized PIN devices by simulation [C] // 2016 International Semiconductor Conference (CAS). October 10-12, 2016, Sinaia, Romania. New York: IEEE Press, 2016: 191-194.
- [10] Ding J F. Research on physical mechanism, simulation model and application of PIN diode [D]. Changsha: Central South University, 2001.
丁家峰. PIN 二极管的物理机制、仿真模型及其应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2001.
- [11] Huang D. Design of X-band high power limiter based on PIN diode [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
黄丹. 基于 PIN 二极管的 X 波段大功率限幅器设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [12] Boles T, Brogle J, Hoag D, et al. AlGaAs PIN diode multi-octave, mmW switches [C] // 2011 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2011). November 7-9, 2011, Tel Aviv, Israel. New York: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [13] Boles T, Brogle J, Hoag D, et al. AlGaAs anode heterojunction PIN diodes [J]. *Physica Status Solidi C*, 2013, 10(5): 786-789.
- [14] Xu Y, Chang B K, Chen X L, et al. Comparative study on the influence of Al component at GaAlAs layer for GaAs/AlGaAs photocathode [J]. *Journal of Semiconductors*, 2017, 38(8): 083002.
- [15] Jubadi W M, Noor S N M. Simulations of variable I -layer thickness effects on silicon PIN diode I - V characteristics [C] // 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA). October 3-5, 2010, Penang, Malaysia. New York: IEEE Press, 2010: 428-432.
- [16] Ahmad M. Effects of intrinsic layer thickness variations on heterojunction PIN diode I - V characteristics [C] // 2016 International Conference on Intelligent Systems Engineering (ICISE). January 15-17, 2016, Islamabad, Pakistan. New York: IEEE Press, 2016: 289-292.