光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260317001

基于场路协同的PIN光电探测器仿真设计

莫元荣[1],周　涛[1],孙　岩[1],徐嘉鑫[1],熊建伟[1],葛菊祥[1],黄峻杰[1],
肖永川[2],陈智宇[1*]

（1. 西南电子设备研究所 微波光子技术四川省重点实验室,成都 610036；2. 重庆光电技术研究所,重庆 400060）

摘　要： 针对传统光电探测器行为级模型仿真精度不足、物理场模型计算代价高的问题,提出一种基于场路协同的PIN光电探测器仿真方法。该方法以三层InP/InGaAs光电探测器为对象,在物理场层面上引入载流子连续性方程与速率方程,计算光电探测器的物理特性,如材料特性、结构特性以及光电流特性;在链路层面,可将由物理场模型获得的物理特性引入链路模型,建立包含器件物理参数耦合的光电探测器模型。仿真结果表明,I区宽度、外加偏压和光敏面面积等参数会显著影响光电探测器的脉冲响应、频率响应和响应度,所建模型能较准确地反映器件动态特性,可为微波光子链路中的噪声评估和系统优化提供支撑。与商业软件相比,所提方法计算效率更高,且仿真准确度能达到90%。

关键词： 光电探测器；速率方程；场路联合协同仿真

中图分类号： TN364　**文章编号：** 1001－5868(2026)02－0320－06

PIN Photodetector Simulation and Design via Coupled Field-Link Simulation

MO Yuanrong[1], ZHOU Tao[1], SUN Yan[1], XU Jiaxin[1], XIONG Jianwei[1], GE Juxiang[1], HUANG Junjie[1], XIAO Yongchuan[2], CHEN Zhiyu[1]

（1. Sichuan Provincial Key Laboratory of Microwave Photonics Technology, Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, CHN; 2. Chongqing Optoelectronic Technology Institute, Chongqing 400060, CHN）

Abstract: To address insufficient simulation accuracy in traditional behavioral-level models of photodetectors and the high computational cost of physical-field models, a simulation method for PIN photodetectors based on field-link co-simulation is proposed. A three-layer InP/InGaAs photodetector was used as the research object. The method introduces the carrier continuity equation and rate equations at the physical-field level to calculate the physical characteristics of the photodetector, including material properties, structural characteristics, and photocurrent characteristics. At the link level, the physical characteristics obtained from the physical-field model are incorporated into the link model, thereby establishing a photodetector model that includes the coupling of device physical parameters. Simulation results show that such parameters as the width of the intrinsic region, the applied bias voltage, and the photosensitive area significantly affect the pulse response, frequency response, and responsivity of the photodetector. The proposed model can accurately reflect the dynamic characteristics of the device and provide support for noise evaluation and system optimization in microwave photonic links. Compared with commercial software, the proposed method achieves higher computational efficiency while maintaining a simulation accuracy of 90%.

Key words: photodetector; rate equations; coupled field-link simulation

收稿日期：2026－03－17.

*通信作者：陈智宇

0　引言

光电探测器作为微波光子链路中的关键组成器件，在现代光纤通信、光学传感以及光电集成等领域中具有重要地位[1]。其中，本征型（PIN）光电探测器凭借灵敏度高、体积小、功耗低以及响应速度快等优势，得到了广泛应用[2-3]。在微波光子系统的设计、研制及性能优化过程中，光电探测器的建模与仿真具有重要意义。借助等效模型，可以对系统灵敏度、响应时间、带宽等指标开展定量分析。

当前，光电探测器的建模方法可大致可归纳为三种类型。第一类为行为级模型，主要依托数学公式快速描述器件的宏观特征[4]；这类模型适合用于链路级仿真，但其结果通常较为理想化，难以体现器件真实的物理属性，例如频率响应特性。第二类为物理场模型，主要基于载流子输运方程和光波导传播方程，能较准确地揭示器件内部的物理机理[5-9]；不过，由于计算量较大，其应用更多集中在器件设计阶段，不适合链路级性能分析。第三类为等效电路模型[10-11]，其重点在于利用电路仿真研究器件外部端口特性，以获取器件的外部性能表现；虽然这种方法便于开展电路层面的分析，但在计算效率和建模精度之间仍较难兼顾。

针对链路级仿真中光电探测器模型精度不足的问题，本文提出一种基于场路协同仿真的光电探测器建模与仿真方法。该方法通过引入器件的材料参数和结构特征，有效提升了建模结果的准确性。构建了一个三层 InP/InGaAs 光电探测器模型：在物理场层面，利用载流子连续性方程和速率方程，对载流子密度分布进行分析，进而求取光电流特性；在链路层面，对场模型实施降维处理，获得器件的频率响应和响应度，并在此基础上建立一个耦合器件物理参数的光电探测器模型。相较于商业软件，该方法的仿真精度能够达到 90%，较好地实现光电探测器建模与仿真在高精度和高效率之间的统一。所提方法不仅为高性能光电探测器设计提供了可靠的建模思路，也为微波光子系统的快速、精准设计提供有力支持。

1　基本原理

PIN 光电探测器由 P 区、I 区和 N 区组成，工作时通常施加反向偏置，使耗尽区主要分布在 I 区并形成较强且近似均匀的电场。入射光子在吸收层中产生电子-空穴对，随后载流子在电场驱动下发生漂移并被电极收集，从而形成光生电流。由于 I 区承担了主要的吸收和漂移收集过程，其厚度、电场强度和材料参数对器件的速度、带宽和噪声性能具有决定性影响。从结构简化角度看，PIN 光电探测器可抽象为一维模型，如图 1 所示。N 区和 P 区主要体现少数载流子的扩散贡献，I 区体现漂移主导的载流子收集过程。该描述为后续建立兼顾物理特性与链路可用性的场路协同模型提供了基础。

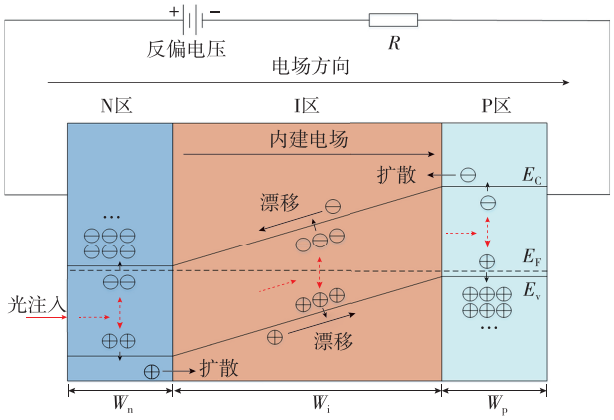


图 1　PIN 光电探测器一维模型示意图

考虑量子效率后，理想情况下光生电流与入射功率满足线性关系：

$$I = \Re P \tag{1}$$

式中，$\Re$ 为响应度，P 为注入探测器的光功率。该关系刻画了探测器对光强的线性响应。

2　仿真原理及方法

实验采用的场路协同方法本质上是一种分层仿真方法：在物理场层求解载流子连续性方程与 I 区速率方程，获得光电流的时域响应和小信号频域响应；在链路层中利用物理场得到的关键参量对行为级模型的关键参数进行校准，使模型同时具备较高的准确性和仿真效率。

以 PIN 光电探测器为例，采用 InP/InGaAs/InP 三层结构，其中 N 区为 n 型 InP 层，I 区为 InGaAs 吸收层，P 区为 p 型 InP 层。仿真针对波长为 1 550 nm 的入射光展开，采用三项常见假设：其一，N 区和 P 区耗尽层相对 I 区宽度可忽略；其二，I 区电场近似均匀，而 N 区和 P 区电场近似为零；其三，入射光由 N 侧进入。在此基础上，N 区和 P 区采用扩散主导的连续性方程进行处理，I 区采用漂移主导的速率方程描述，从而形成扩散-漂移联合模型。仿真方法

如图2所示。

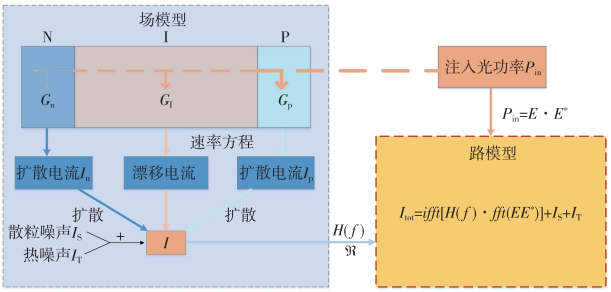


图2 PIN光电探测器仿真方法示意图

对于三层InP/InGaAs结构，材料内部的光生载流子产生率满足Beer-Lambert衰减规律，并考虑器件反射修正，则材料内部位置x处的光生载流子产生率为：

$$G(x)=\frac{P_{in}(t)(1-r)}{S\cdot h\nu}\alpha\exp(-\alpha x) \tag{2}$$

式中，r为反射系数，α为吸收系数，S为入射光横截面积，P_{in}为入射光功率，$h\nu$为单光子能量。各区域的总产生率可由对区域内$G(x)$的积分得到，并分别记为G_N，G_I和G_P。

对于N区和P区，采用稳态少子扩散方程描述中性区输运过程，即：

$$D\frac{d^2\Delta n}{dx^2}-\frac{\Delta n}{\tau}+G(x)=0 \tag{3}$$

式中，D为扩散系数，τ为少子寿命。通过求解该边值问题，可分别获得N区空穴扩散电流和P区电子扩散电流，并作为中性区向耗尽层注入的边界贡献。

对于I区，采用均匀电场近似，其平均电场为：

$$E_I=\frac{V_{bi}-V_{bias}}{W_I} \tag{4}$$

式中，V_{bi}为内建电势，V_{bias}为外加偏压，W_I为I区厚度。电子和空穴分别采用场依赖漂移速度模型[12]：

$$v_n=\frac{\mu_n E_I+v_{n,sat}\left(E_I/E_{th}\right)^4}{1+\left(E_I/E_{th}\right)^4} \tag{5}$$

$$v_p=\frac{\mu_p E_I}{1+\mu_p E_I/v_{p,sat}} \tag{6}$$

式中，μ_n与μ_p分别为电子和空穴的迁移率，$v_{n,sat}$和$v_{p,sat}$为电子与空穴饱和漂移速度，E_{th}为I区材料的阈值电场。由此，电子和空穴的渡越时间分别为：

$$\tau_{nt}=\frac{W_I}{v_n},\quad \tau_{pt}=\frac{W_I}{v_p} \tag{7}$$

在此基础上，I区电子与空穴浓度满足速率方程：

$$\frac{dn_I}{dt}=G_I-\frac{n_I}{\tau_{nt}}-\frac{n_I}{\tau_{nr}}+\frac{I_{n,P}^{diff}}{qW_IS} \tag{8}$$

$$\frac{dp_I}{dt}=G_I-\frac{p_I}{\tau_{pt}}-\frac{p_I}{\tau_{pr}}+\frac{I_{p,N}^{diff}}{qW_IS} \tag{9}$$

式中，τ_{nr}和τ_{pr}分别为电子和空穴的寿命，$I_{n,P}^{diff}$与$I_{p,N}^{diff}$分别为P区电子扩散电流和N区空穴扩散电流，G_I为I区有效光生项。

由I区载流子浓度可进一步得到场模型的本征光电流：

$$I_{int}(t)=qSn_I(t)v_n+qSp_I(t)v_p \tag{10}$$

此外，为表征高频下寄生参数对器件带宽的限制，在场模型得到的本征光生电流$I_{int}(t)$的基础上，引入一阶RC等效模型。结电容表示为：

$$C_j=\varepsilon_r\varepsilon_0\frac{S}{W_I} \tag{11}$$

式中，ε_r为I区材料相对介电常数，ε_0为真空介电常数。进一步考虑附加寄生电容C_{par}、串联寄生电阻R_s和外部负载电阻R_L后，器件总电容和总串联电阻可表示为：

$$C_{tot}=C_j+C_{par} \tag{12}$$

$$R_{tot}=R_L+R_s \tag{13}$$

考虑RC延迟后的输出电流为$I_{out}(t)$，则其满足一阶低通微分方程：

$$R_{tot}C_{tot}\frac{dI_{out}(t)}{dt}+I_{out}(t)=I_{int}(t) \tag{14}$$

通过输入扫频信号分析场模型得到的光电流响应，可提取PIN光电探测器的频率响应函数$H(f)$和响应度$\Re$：

$$H(f)=\frac{I_{out}(f)}{P_{in}(f)} \tag{15}$$

$$\Re=\frac{I_{out}(t)}{P_{in}(t)} \tag{16}$$

修正光电探测器的链路模型可得到场路协同的精准模型，相对于物理模型提高了计算效率。场模型结果应用于链路模型的公式如下：

$$I=ifft\left[H(f)\cdot fft\left(EE^*\right)\right] \tag{17}$$

式中，E为输入光场。

本文主要关注PIN光电探测器的高速脉冲响应及吉赫兹频段的频率响应，而$1/f$噪声主要在低频范围内较为显著，因此模型中忽略$1/f$噪声，仅叠加散粒噪声和热噪声，以表征实际探测输出：

$$I_{\mathrm{tot}}=I+I_{\mathrm{S}}+I_{\mathrm{T}} \tag{18}$$

式中，I_{S}代表散粒噪声，I_{T}代表热噪声，分别表示为$\langle I_{\mathrm{n}}^2\rangle=2qI\Delta f$和$\langle I_{\mathrm{T}}^2\rangle=4kT\Delta f/R_{\mathrm{tot}}$。

由此，本文模型同时具备器件内部载流子输运分析能力和链路响应预测能力。该方法在保持主要物理机制的前提下，将中性区扩散、耗尽层漂移、复合损耗以及噪声效应纳入分析，可用于PIN光电探测器时域响应与频域特性的联合分析。

该方法具有三方面优势：一是参数耦合关系清晰，I层宽度、掺杂和材料吸收等结构信息可以通过漂移时间、复合寿命等物理量进入链路模型；二是便于噪声传播分析，可在链路层叠加输入散粒噪声和热噪声；三是避免在系统参数扫描时反复求解高维偏微分方程，从而显著降低计算开销。

3　仿真结果分析

3.1　仿真参数设置

为验证模型准确性，对不同I区宽度、外加偏压和光敏面面积条件下的PIN光电探测器动态特性进行仿真分析。器件性能与I区宽度及外加偏压密切相关，仿真所用的主要参数见表1。

表1　参数列表

参数	数值
InP电子迁移率	5 400 $\mathrm{cm^2/(V\cdot s)}$
InP空穴迁移率	150 $\mathrm{cm^2/(V\cdot s)}$
InP吸收系数	1 000 $\mathrm{cm^{-1}}$
InGaAs电子迁移率	12 000 $\mathrm{cm^2/(V\cdot s)}$
InGaAs空穴迁移率	330 $\mathrm{cm^2/(V\cdot s)}$
InGaAs电子饱和速度	2.5×10^7 cm/s
InGaAs空穴饱和速度	5×10^6 cm/s
InGaAs吸收系数	6 800 $\mathrm{cm^{-1}}$
InGaAs阈值电场	4×10^7 V/m
InGaAs相对介电常数	13.9
InGaAs载流子寿命	0.1 μs
P区宽度	0.2 μm
N区宽度	0.2 μm
P区受主浓度	5×10^{20} $\mathrm{cm^{-3}}$
N区施主浓度	5×10^{19} $\mathrm{cm^{-3}}$
本征载流子浓度	1.5×10^{16} $\mathrm{cm^{-3}}$
I区内建电势	0.6 V
反射系数	0.1
寄生电容	1 pF
外部负载电阻	50 Ω
寄生电阻	1 Ω

3.2　脉冲响应分析

图3到图5给出了不同参数下探测器的输出光电流变化。由图3可见，随着I区厚度从0.8 μm增大到10 μm，输出光电流幅值明显增大，其中5～8 μm时提升最明显，但同时脉冲下降沿拖尾加重，说明I区加厚虽有利于光吸收和载流子收集，却会延长载流子渡越时间，降低瞬态响应速度。由图4可见，反向偏压从0 V增大到5 V，输出光电流峰值变化很小，基本保持在同一水平，但上升沿和下降沿明显变陡，表明反向偏压主要改善响应速度，而不是输出幅值。由图5可知，随着光敏面面积增大，输出光电流仅有小幅提升，各曲线整体接近，说明在该范围内光敏面面积对脉冲响应的影响较弱。

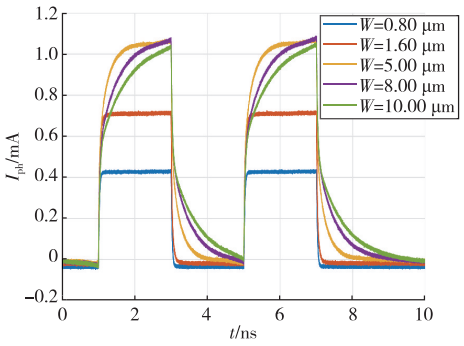


图3　不同I区厚度下的脉冲响应时间仿真结果

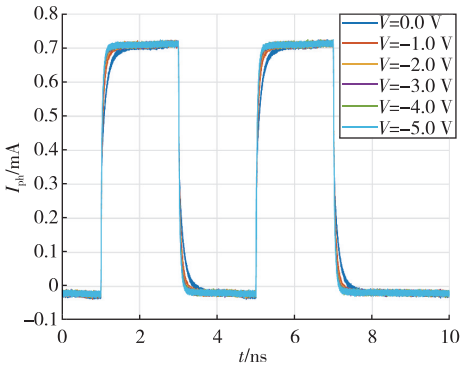


图4　不同反向偏压下的脉冲响应时间仿真结果

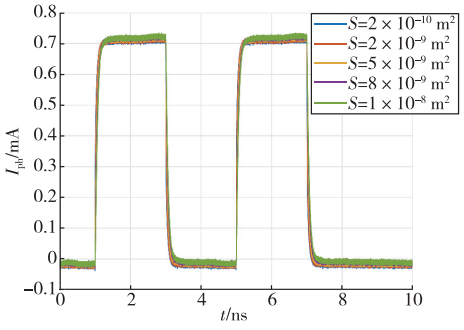


图5　不同光敏面面积下的脉冲响应时间仿真结果

3.3　频率响应分析

图6～8给出了不同参数下探测器的频率响应特性。由图6可见，随着I区厚度由0.8 μm增大到

10 μm，器件在低频区域的响应差异较小，但在中高频区域的衰减加快，带宽明显减小。结合对图3的分析，说明I区厚度对器件存在增益-带宽的折中关系，即较厚I区有利于提高响应幅值，但会牺牲高频性能，因此需选择合适的中间值。由图7可见，随着反向偏压增大，频率响应曲线向高频方向延伸，说明器件带宽提高；但在较大偏压下，各曲线差异减小，表明偏压的改善作用会逐渐趋于饱和。由图8可见，随着光敏面面积增大，频率响应曲线整体向低频侧移动，高频衰减明显，器件带宽逐渐减小。这说明光敏面面积增大后，结电容随之增加，RC时间常数增大，进而削弱了器件的高频响应性能。因此，较小的光敏面面积更有利于带宽提升。

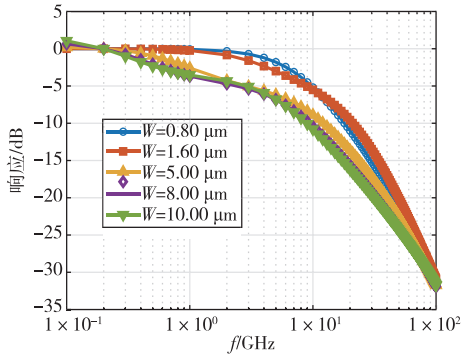


图6 不同I区厚度下的频率响应时间仿真结果

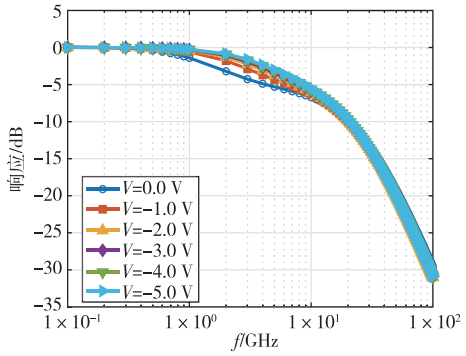


图7 不同反向偏压下的频率响应时间仿真结果

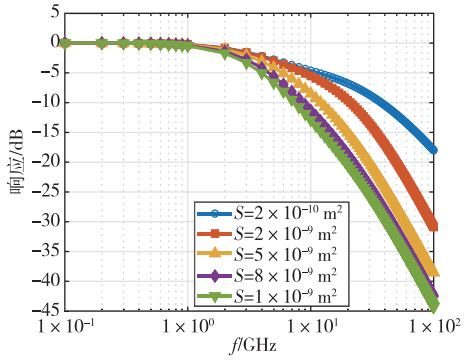


图8 不同光敏面面积下的频率响应时间仿真结果

3.4 响应度分析

图9～11给出不同参数下探测器响应度的变化。由图9可见，响应度随I区厚度增加而显著上升，在8 μm时达到最大值1.091 A/W，继续增大到10 μm后略有下降，说明适当增加I区厚度能够提高光生载流子的收集效率，但过厚会使传输损耗增加。由图10可见，反向偏压从0 V增加到5 V，响应度仅由0.689 A/W小幅增至0.693 A/W，说明偏压对响应度影响不显著。由图11可见，随着光敏面面积增大，响应度由0.679 A/W逐步提高到0.752 A/W，表现为缓慢上升趋势，说明增大光敏面面积有助于提升有效光吸收，但影响程度弱于I区厚度。

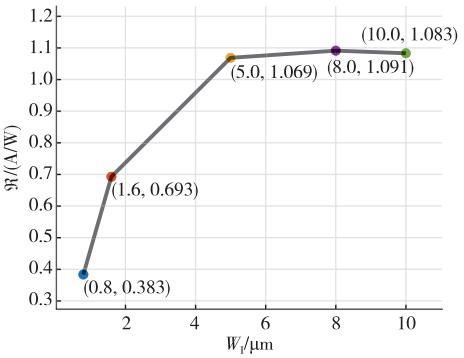


图9 不同I区厚度下的响应变化仿真结果

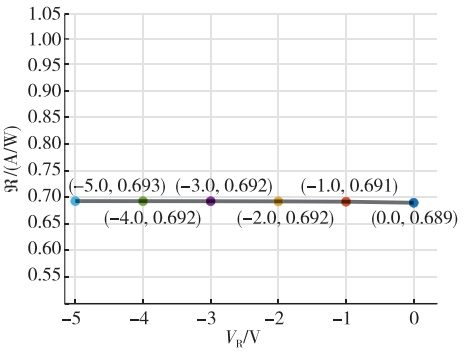


图10 不同反向偏压下的响应变化仿真结果

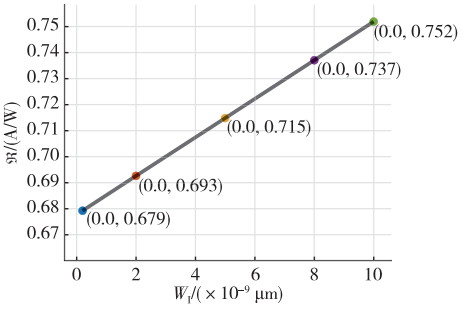


图11 不同光敏面面积下的响应变化仿真结果

综上所述，I区厚度是影响探测器性能的关键参数，增大I区厚度能够显著提高输出光电流和响应度，但会削弱高速响应能力；反向偏压主要用于改善脉冲响应和频率响应，对响应度影响较小；光敏面面积的增大则对频率响应和响应度有一定促进作用，但对响应速度影响较小。因此，在器件设计中，应综合权衡响应度、输出电流和带宽，选择合适的I区厚度与偏压条件，以获得更优的整体性能。

3.5　结果验证

为进一步验证模型的准确性，将建模和仿真结果与使用商业半导体仿真软件ATLAS在相同物理结构和材料参数下获得的结果进行比较。图12显示了PIN光电探测器在反向偏压为1 V时的3 dB带宽仿真对比结果。所提出的模型的频率响应特性仿真精度能够达到90%，实现了高逼真和高效率兼顾的光电探测器建模和仿真。

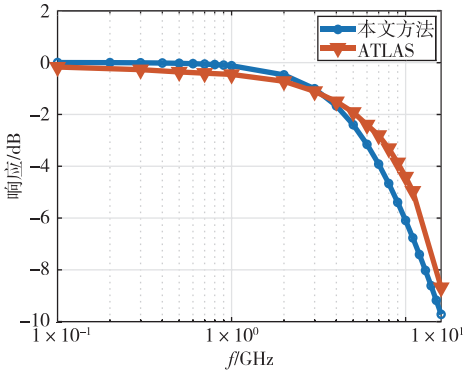


图12　与商用软件仿真结果的对比图

4　结论

本文围绕微波光子链路中的关键跨域器件PIN光电探测器，提出兼具准确度和仿真效率的场路协同高精度仿真方法。该方法基于载流子连续性方程和I区速率方程，建立了从器件物理参数到链路特性之间的对应关系；同时通过提取响应度与频率响应等参数，实现了场模型向链路模型的降维。结果表明，该模型能够较准确地反映I区宽度、外加偏压和光敏面面积等参数对光电探测器动态特性的影响，可为后续微波光子链路的信号分析、参数扫描与系统优化提供可复用的模型基础。

参考文献：

[1] Li G, Wang Y, Huang L, et al. Research progress of high-sensitivity perovskite photodetectors: a review of photodetectors: noise, structure, and materials [J]. ACS Applied Electronic Materials, 2022, 4(4): 1485-1505.

[2] Lambrechts J W. High-frequency pulsed laser response of a PIN InGaAs photodetector[J]. Fourth Conference on Sensors, MEMS, and Electro-Optic Systems, 2017, 10036: 100360Z.

[3] Chen S, Li L, Wu H, et al. A comprehensive consideration of bias voltage and temperature to extract the intrinsic frequency response of photodiodes[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(32): 3727-3733.

[4] Liu H, Yang J. Application research of high performance photodetector[J]. Proc. of SPIE, 2022, 12294: 1229426 .

[5] Wilson S P, Woods S J, Walker A B. Modelling of p-i-n photodiodes under high illumination conditions [J]. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 1997, 10(3): 139-151.

[6] Malik D, Das U. Design and modeling of an efficient high-speed InGaAs/InP QW waveguide-photodetector[J]. Optical and Quantum Electronics, 2023, 55(4): 353.

[7] Yang D, Huang Y, Duan X, et al. The tunable phase shift of high-speed PIN photodetector and modified uni-traveling carrier photodetector[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(6): 1873-1879.

[8] Zhu M, Chen J, Lv J, et al. Simulation and optimization of p-i-n $In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP photodetector [J]. Proc. of SPIE, 2015, 9674: 96742D.

[9] Niu H, Huang Y, Yang Y, et al. Influence of the incident optical field distribution on a high-speed PIN photodetector and horizontal optimization[J]. Applied Optics, 2021, 60(3): 727-734.

[10] Deilami S, Abbasi K, Houshyar A, et al. Study the effect of temperature variation and intrinsic layer thickness on the linear response of a PIN photodetector: a finite element method approach[J]. Results in Engineering, 2023, 17: 100810.

[11] 许文彪，陈福深，陈　苗，等. 基于等效电路模型的雪崩光电探测器特性分析[J]. 半导体光电，2011，32(3)：336.
Xu Wenbiao, Chen Fushen, Chen Miao, et al. Characteristic analysis of avalanche photodedetector based on equivalent circuit model[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(3): 336.

[12] 赵　军. 光电探测器等效电路模型和实验研究[D]. 重庆：重庆大学，2015.
Zhao Jun. Research on photodetector equivalent circuit model and experiment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

作者简介：

莫元荣(2001—)，男，重庆市人，硕士研究生，主要从事微波光子学的研究；

陈智宇(1986—)，男，四川省人，博士，正高级工程师，主要从事微波光子系统仿真研究。